

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Realizace dvoukanálového optického vysílače s řízeným zpožděním

Realization of the two channel optical transmitter

2009

Bc. Jan Matal

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6. května 2009

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. Za odborné vedení diplomové práce a za obětavou pomoc s teoretickou i praktickou částí této práce.

Dále děkuji katedře telekomunikační techniky za možnost vypracování diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je provést rozbor činnosti optických vysílačů a následně provést měření pro zjištění velikosti zpoždění signálu pomocí dvou realizovaných optických vysílačů. Teoretický rozbor v tomto případě umožňuje základní pochopení optického vysílače. Informace z teoretického rozboru zároveň poslouží pro návrh a následnou konstrukci zařízení. Pomocí dvou zhotovených vysílačů provedeme několik měření, která budou doplněna o vyhodnocovací část. Veškeré naměřené hodnoty budou odečteny pomocí laboratorních přístrojů, což by mělo zaručovat věrohodné výsledky.

Klíčová slova: optický vysílač, LED, laserová dioda, optický signál, zdroj optického záření, schéma vysílače

Abstract

Objective of this diploma thesis is to analyze performance of optical transmitters and consecutively to realize the measuring for size detection of delayed signal with two made optical transmitters. Theoretical analysis in this case allowed the basic understanding of optical transmitter. Information from theoretical analysis simultaneously serves for project and construction of device. By means of two made transmitters is taken several measurement, which are fill with evaluated part. All measured results will be finding out by precise laboratory devices that guarantee credible results.

Keywords: optical transmitter, LED, laser diode, optical signal, optical radiation source, transmitter schema

Seznam použitých symbolů a zkratek:

A	– anoda
A/cm ²	– Ampér na cm čtvereční
Al	– <i>Aluminium</i> – hliník
AM	– <i>Amplitude modulation</i> – amplitudová modulace
APP	– atmosférické přenosové prostředí
As	– <i>Arsenicum</i> – Arsen
B _F	– proudový zesilovací činitel
c	– rychlost světla [m/s]
CFA	– <i>Current Feedback Amplifier</i> – proudová zpětná vazba
DBF	– <i>Distributed Feed Back</i> – zpětná vazba
DBR	– Distributed Bragg Reflector – distribuovaný braggovský reflektor
DG	– <i>Delay Generator</i> – zpožďovací generátor
E	– Energie [J]
eV	– elektron Volt
f	– frekvence [Hz]
FeCl ₃	– chlorid železitý
FM	– <i>Frequency modulation</i> – frekvenční modulace
F _T	– tranzitní frekvence
Ga	– <i>Gallium</i> – Gallium
Gbit/s	– GigaBit za sekundu – jednotka informace 10 ⁹ bitů za sekundu
GHz	– GigaHertz – jednotka frekvence
h	– Planckova konstanta
I	– proud [A]
In	– <i>Indium</i> – Indium
IR	– <i>Infra Red</i> – infra červená
I _{th}	– prahový proud
K	– katoda
kHz	– kilo Hertz
LASER	– <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> – zdroj monochromatického koherentního světla
LD	– <i>Laser diode</i> – laserová dioda
LED	– <i>Light emitting diode</i> – polovodičová dioda vyzařující nekoherentní světlo

LT	– Linear Technology
mA	– mili Ampér
Mbit/s	– MegaBit za sekundu – jednotka informace 10^6 bitů za sekundu
MHz	– Mega Hertz
MS	– měřicí systém
mV	– mili Volt
mW	– mili Watt – jednotka výkonu
nm	– nano metr
ns	– nano sekunda
OBS	– optický bezkabelový spoj
OOK	– <i>ON-OFF- KEYING</i> – ON-OFF klíčování
OZ	– operační zesilovač
P	– <i>Phosphorus</i> – Fosfor
PDA	– <i>photo amplified detector</i> – detektor světelného záření
Pk	– <i>peak</i> – vrchol
PM	– <i>Phase modulation</i> – fázová modulace
PN	– polovodičový přechod PN
R	– značka pro rezistor
RS – 232	– <i>Recommended Standard 232</i> – Doporučený standard č. 232
Sb	– <i>Stibium</i> – Antimon
SR	– <i>Slew Rate</i> – rychlost přeběhu
TTL	– <i>Transistor Transistor Logic</i> – tranzistorově tranzistorová logika
U_c	– napětí kolektoru
V	– Volt – jednotka napětí
VCSEL	– <i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i> – laser vyzařující z horní plochy čipu
WDM	– <i>Wavelength Division Multiplexing</i> – vlnově dělený multiplex
λ	– vlnová délka [m]

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Základy optického komunikačního systému.....	9
2.1	Všeobecný popis optického komunikačního systému.....	9
2.2	Optické bezkabelové spoje.....	9
2.2.1	Charakteristika optického komunikačního systému.....	10
2.2.2	Složení optického vysílače.....	10
2.3	Optické zdroje	12
2.3.1	Princip diody LED	14
2.3.2	Dva typy PN přechodů.....	16
2.3.3	Princip laserové diody (LD).....	18
2.4	Vlastnosti optických vysílačů	21
2.4.1	Používané metody modulací	21
3	Návrh a realizace optického vysílače.....	25
3.1	Návrh optického vysílače.....	25
3.1.1	Volba operačního zesilovače.....	26
3.1.2	Návrh výkonového zesilovače	29
3.1.3	Volba pracovního bodu	30
3.2	Simulace návrhu.....	31
3.3	Realizace schématu	33
4	Provedená měření.....	37
4.1	Měření signálu pomocí laserové diody	37
4.2	Měření signálu pomocí LED diody.....	41
4.3	Měření zpoždění signálu	42
5	Závěr	47
6	Literatura.....	49

1 Úvod

Ve své diplomové práci se zabývám problematikou optických vysílačů. Jelikož za posledních 20 let došlo k velkému rozmachu ve vědních oborech, jako jsou optika a optoelektronika je nadmíru jasné, že právě tyto obory se staly pilíři pro vysokorychlostní přenos informací. V mnoha praktických aplikacích, ať už v průmyslu nebo v laboratorním prostředí, se užívá pro přenos signálu různých optických komunikačních prostředků. Samotné optické komunikace se dnes používají pro přenos dat, hlasu, telemetrických údajů a obrazu na dlouhé vzdálenosti pomocí kabelových nebo bezkabelových spojů. Optické komunikační technologie poskytují uživateli obrovské přenosové kapacity a zároveň odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Cílem této diplomové práce je vytvořit návrh a následnou realizaci optického vysílače s přenosovou rychlostí 10 Mbit/s a provést s nimi stanovená měření.

V druhé kapitole diplomové práce se zabývám rozбором optických vysílačů. Samotný vysílač se skládá ze tří hlavních částí a to ze zesilovače, impedančních obvodů a zdroje světelného záření. Všechny tři části spolu úzce souvisí a je nemožné řešit některou z těchto částí bez ohledu na ostatní. V této části jsou popsány hlavní požadavky kladené na jednotlivé části optického vysílače. Největší pozornost je kladena na výběr optického zdroje. Těmi nejpoužívanějšími jsou v telekomunikační technice speciální LED nebo častěji používané laserové diody. Ve zmíněné části budou popsány jejich hlavní výhody a nevýhody. S přenosem signálu souvisí i vhodná volba modulace, která bude také rozebrána v této části. Základní schémata optických vysílačů s užitím LED nebo laserové diody budou vyobrazeny a zjednodušeně popsány jejich principy činnosti.

Třetí část diplomové práce se bude zabývat vhodným návrhem a následnou realizací optického vysílače. Jeho hlavní části budou tvořit operační zesilovač, výkonový zesilovač a zdroj optického záření. V této části bude popsána cesta od prvotních návrhů jednotlivých částí až k samotnému finálnímu schématu. Součástí této kapitoly bude ukázka řešení návrhu pomocí simulačního programu, který se využije pro ověření funkčnosti zapojení. Dále budou v této kapitole obsaženy postupy při výrobě optického vysílače a otestovány prvotní měření na nepájivém kontaktním poli.

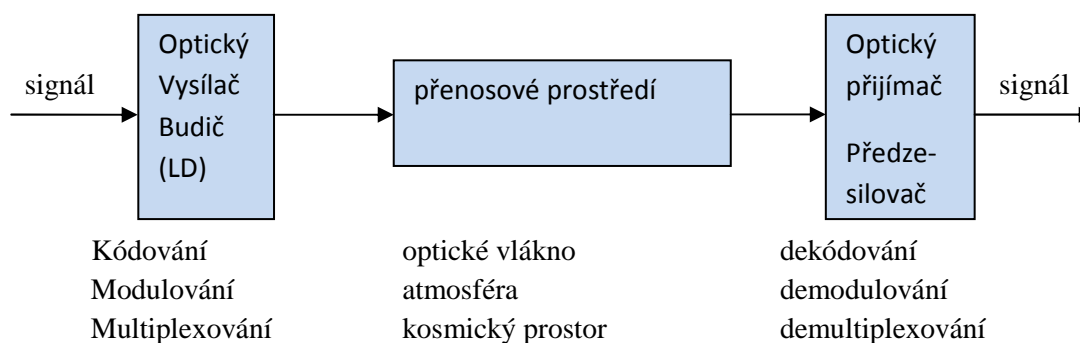
Ve čtvrté kapitole bude zmíněn postup pro změření velikosti zpoždění signálu za užití digitálního zpožďovacího generátoru. Této části budou přecházet další měření, pro výběr vhodného zdroje optického záření. Jednotlivé dílčí postupy pro určování požadovaných hodnot budou detailně popsány v jednotlivých odstavcích této kapitoly.

2 Základy optického komunikačního systému

2.1 Všeobecný popis optického komunikačního systému

Orientace na optickém komunikačním systému v komunikacích je dána řadou předností, které tyto systémy mají vzhledem ke klasickým systémům např. koaxiálním. Na tomto místě je třeba zdůraznit, že obecně zahrnujeme do optických komunikačních systémů jak systémy s optickými vlákny tak i atmosférické spoje. Atmosférické spoje se vzhledem ke značnému útlumu v atmosféře používají jen na krátké vzdálenosti a to stovky metrů až jednotky kilometrů [1].

Optický komunikační systém je zařízení určené k přenosu a zpracování informace pomocí optické nosné vlny, která může být energická nebo vlnově dělena do několika optických kanálů. Skládá se ze tří základních částí: optického vysílače, přenosového prostředí a optického přijímače. Optický komunikační systém zahrnuje řadu specifických členů: modulátory, demodulátory, kodéry, dekodéry, multiplexory, demultiplexory, vazební členy a podobně. Na obrázku 1 je znázorněno základní schéma optického komunikačního systému [2].



Obrázek 1: Základní představa optického komunikačního systému [upraveno podle 1]

2.2 Optické bezkabelové spoje

Optickým bezkabelovým spojem (OBS) se rozumí plně duplexní spoj, který k přenosu informace v atmosférickém přenosovém prostředí (APP) využívá optickou nosnou vlnu obsahující jeden nebo více vlnově dělených kanálů, jejichž optický výkon je soustředěn do jednoho nebo více úzkých svazků. V nejjednodušším případě je spoj navržen pro přenos signálu s digitální intenzitní modulací. Jedná se o optické spoje provozované jak v uzavřené místnosti, tak ve volném ovzduší (troposféře) nebo v kosmickém prostoru.

APP má značný vliv na kvalitu přenosu. APP je prostředí obecně nestacionárním a nehomogenním (předpokládá se, že také dielektrickým, lineárním, nedisperzním, izotropním) a jeho vliv na kvalitativní parametry přenosového kanálu má náhodný charakter [2].

2.2.1 Charakteristika optického komunikačního systému

Optický komunikační systém je podobný v základním pojetí jakémukoliv jinému komunikačnímu systému. Funkce obecného komunikačního systému je přenést signál z informačního zdroje přes přenosové prostředí k cíli. Na tomto místě je třeba zdůraznit, že v obecnosti zahrnujeme do optických komunikačních systémů jak systémy s optickými vlákny tak i atmosférické spoje.

Optický vysílač transformuje elektrický signál na optický a realizuje tak požadovanou modulaci optického signálu. Druhům modulace pak odpovídají požadavky na zdroj optického signálu, kterým je nejčastěji luminiscenční nebo laserová dioda. Při intenzitní modulaci nemusí být tak přísné požadavky na spektrální vlastnosti, případně koherentní vlastnosti jako při fázové nebo frekvenční modulaci. Na druhé straně se požadavky na spektrální vlastnosti optické nosné zpřísňují při zvyšování rychlosti přenosu a to i při intenzitní modulaci jak z hlediska samotného výstupního signálu vysílače tak i dalších částí přenosového systému, zejména optického kabelu. Nároky na dynamické vlastnosti vysílače vycházejí z požadavků na rychlost přenosu. Znamená to, že žádnou část systému nelze řešit bez ohledu na vazbu s dalšími částmi.

2.2.2 Složení optického vysílače

Optický vysílač obecně obsahuje zesilovač elektrického signálu, obvody impedančního přizpůsobení, optický zdroj tvořený obvykle luminiscenční nebo častěji laserovou diodou, případně izolátor. Požadavky na jednotlivé části jsou následující.

- a) Zesilovač spolu s impedančním přizpůsobením má výkonově upravit elektrický signál a zabezpečit impedanční polovodičové diody pro dosažení minimálního poměru stojatých vln. Nároky na přizpůsobení rostou se zvyšující se frekvencí přenášeného (modulačního signálu), která může dosáhnout hodnot desítek až stovek GHz, což odpovídá přenosovým rychlostem desítky Gbit/s. Je třeba podotknout, že tyto hodnoty odpovídají nejrychlejším přenosovým systémům.

b) Zdroj optického signálu musí splňovat tyto požadavky:

- malé rozměry a váha
- jednoduchý princip modulace při velkých rychlostech (Gbit/s)
- snadná volba vyzařování na definované vlnové délce
- úzká šířka vyzařovacího spektra, vysoká koherence záření
- vysoká linearita převodní charakteristiky $P=f(I)$ pro analogové optické systémy
- minimální změna vlnové délky (frekvence) při přímé modulaci
- minimální překmity při přímé modulaci
- stabilní výstupní výkon a vlnová délka záření
- možnost rychlého přeladění na jinou vlnovou délku se zachováním její časové stability
- nízká cena, jednoduchá výroba a velká vytiženost při výrobě
- výkon umožňující získat po průchodu optickou trasou detekovatelný výstupní výkon na přijímači
- přenosovou rychlost, umožňující použít požadovaný typ modulace
- šířku spektrální čáry pro minimalizaci chromatické disperze ve vlákne, případně možnost přenosu na více nosných vlnových délkách současně bez vzájemného ovlivňování (vlnový multiplex);
- šum, který ovlivňuje minimální úroveň detekovatelného signálu a omezuje použití některých typů modulace (např. fázový šum, projevující se náhodnými změnami fáze signálu omezuje použití fázové modulace)
- další vlastnosti jako je mechanická odolnost, necitlivost na změny okolí (např. teplotní) apod.

Jako optické zdroje se používají luminiscenční a laserové diody. Mezi výhody laserových diod patří vysoký emitovaný výkon (až desítky mW), vysoká přenosová rychlost a malá šířka spektra. Nevýhodou je citlivost na teplotu, která se řeší chladicím systémem, např. Peltierovými články nebo zavedením zpětné vazby, samozřejmě na úkor vyšší ceny zdroje. Mnohavidové lasery vykazují fluktuace výkonu vlivem náhodného rozdělení výkonu mezi vidy. Ke změně frekvence emitovaného záření také dochází vlivem změn injekčního proudu. Při požadované vysoké kvalitě optického záření jednovidových laserů se mohou negativně uplatnit intenzitní fluktuace, způsobené změnami koncentrace nosiči náboje a tím i změnami indexu lomu.

Luminiscenční diody se zhotovují jako povrchově nebo hranově emitující. Jejich použití omezuje větší šířka spektrální čáry. Při vysokém emitovaném výkonu lze dosáhnout přenosových rychlostí až 100 Mbit/s, při sníženém výkonu až 500 Mbit/s.

Jednovidové systémy používají lasery s dvojitou heterostrukturou InGaAsP/InP s co nejmenší šířkou spektrální čáry vzhledem k materiálové disperzi v optickém vlákne. Pro vysoké modulační rychlosti jsou nejvhodnější jednofrekvenční lasery (s jedním podélným videm). Patří mezi ně lasery s vnějším rezonátorem, s rozprostřenou vazbou (DFB) a rozprostřeným braggovským zrcadlem (DBR). Jako nejslibnější se zdají lasery s kvantovými jámami, zejména pnutými vrstvami InGaAs, které při nižších hodnotách prahového proudu (menší než 50 A/cm²) dosahují šířky pásma až 100 GHz. Jako perspektivní pro budoucnost pak jsou lasery s kvantovými dráty a body.

- c) Optický izolátor nemusí být nutně zařazen ve všech přenosových systémech. Je nezbytný tam, kde by odražený optický výkon od čela optického vlákna a dalších nehomogenit v optické trase ovlivňoval kvalitu vyzařované optické vlny. Jedná se především o koherentní systémy přenosu a systémy s velkou přenosovou rychlostí, kde je třeba omezit fázové a intenzitní fluktuace [1].



Obrázek 2: Zjednodušené schéma optického vysílače.

2.3 Optické zdroje

Optické zdroje záření dělíme podle jednoduchého kritéria na monochromatické nekoherentní, do níž spadají polovodičové LED diody a na monochromatické koherentní, ke kterým patří polovodičové lasery. Jak již bylo zmíněno, mezi hlavní částí optického vysílače patří řídicí obvody a optický zdroj. Řídicí obvod přeměňuje elektrický signál na vyzařovací řídicí proud a optický zdroj přemění tento proud na světelný paprsek. Dva hlavní světelné zdroje užívané v telekomunikační technice jsou elektroluminiscenční a laserové diody. Tyto optické zdroje mají několik požadavků. Za prvé, by měly být lineární s elektrickým vstupním signálem,

aby minimalizovaly zkreslení a šum. Za druhé, by měly vysílat světlo ve vlnových délkách, které mají nízké ztráty a malé rozptýlení. V poslední řadě by měly mít schopnost udržet stabilní optický výstup při teplotních změnách. Pro polovodičové zdroje záření jsou významné dva procesy.

- absorpce fotonu, která může způsobit přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu a tím generaci páru elektron-díra.
- emise fotonu, k níž může dojít při přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu [4].

Na obrázku 6 je znázorněna v pořadí absorpce fotonu, spontánní a stimulovaná emise.

Pro vyzářený foton platí vztah:

$$E = E_2 - E_1 = hf = h \frac{c}{\lambda}, \quad (1)$$

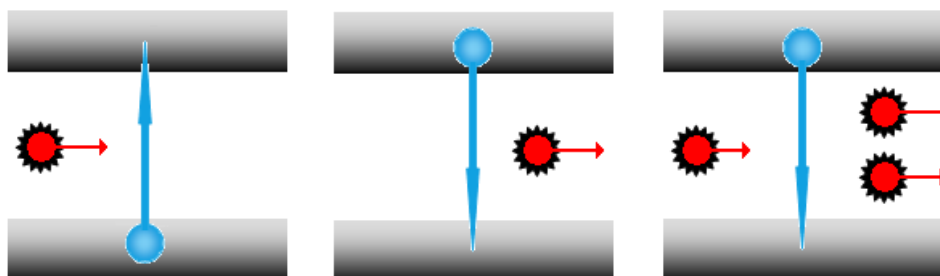
kde E je energie fotonu

h je Planckova konstanta

f je frekvence

c je rychlost světla

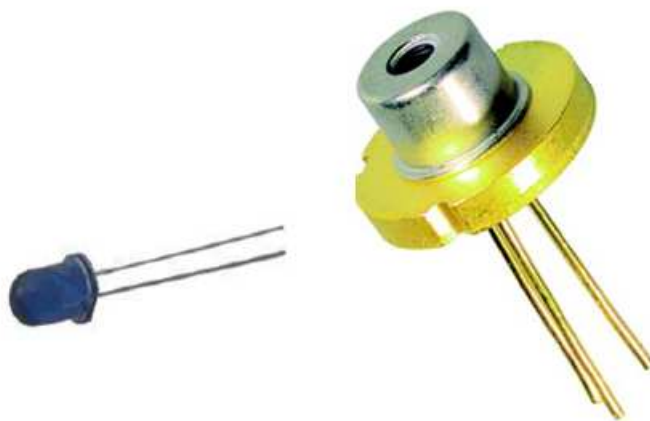
λ je vlnová délka



Obrázek 3: Absorpce, emise a spontánní emise fotonu. [upraveno podle 3]

K uvedeným procesům může dojít za splnění určitých podmínek. Z hlediska definování těchto podmínek se zaměříme na emisi fotonu, významnou pro realizaci polovodičových zdrojů záření. Aby došlo k emisi fotonu, říkáme také zářivé nebo přímé rekombinaci, je třeba splnit dvě podmínky. Vedle první, samozřejmé podmínky zachování energie je třeba splnit podmínku zachování hybnosti. Protože jak elektron, tak díra se chovají jako částice s určitou hybností, musí se při rekombinaci vyrušit i tyto hybnosti. Za termodynamické rovnováhy se snaží každý systém dostat do stavu s minimální energií. Znamená to, že elektrony zaujímají energetické hladiny v minimu vodivostního pásu a díry v maximu valenčního pásu. Ne každý polovodičový materiál je vhodný pro realizaci optických zdrojů. Vhodnými polovodiči, tj. polovodiči

s přímými přechody jsou některé sloučeniny III. Skupiny (Al, Ga, In) a V. skupiny (P, As, Sb) Mendělejevovy periodické soustavy, tedy prvků tří a pětimocných. Typickým příkladem je GaAs.



Obrázek 4: LED a laserová dioda

2.3.1 Princip diody LED

Název **LED** je odvozen z názvu **Light Emitting Diode**, což v překladu znamená dioda, která vyzařuje optické záření. Je to elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Je u ní využíván princip elektroluminiscence, při které je PN přechodem vyzařováno optické záření. Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Přiložením napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Při přechodu elektrických nábojů přes přechod dochází k rekombinaci elektronů s děrami. Vlivem přiloženého elektrického pole přešly elektrony na vyšší energetickou hladinu.

Elektron zůstane na vyšší hladině různou dobu, podle toho jak stabilní bude jeho stav. Dříve nebo později však vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum. Učiní tak sám od sebe, spontánně a proto hovoříme o spontánní emisi záření. Kdy se to stane, je pro každý jednotlivý atom věcí náhody.

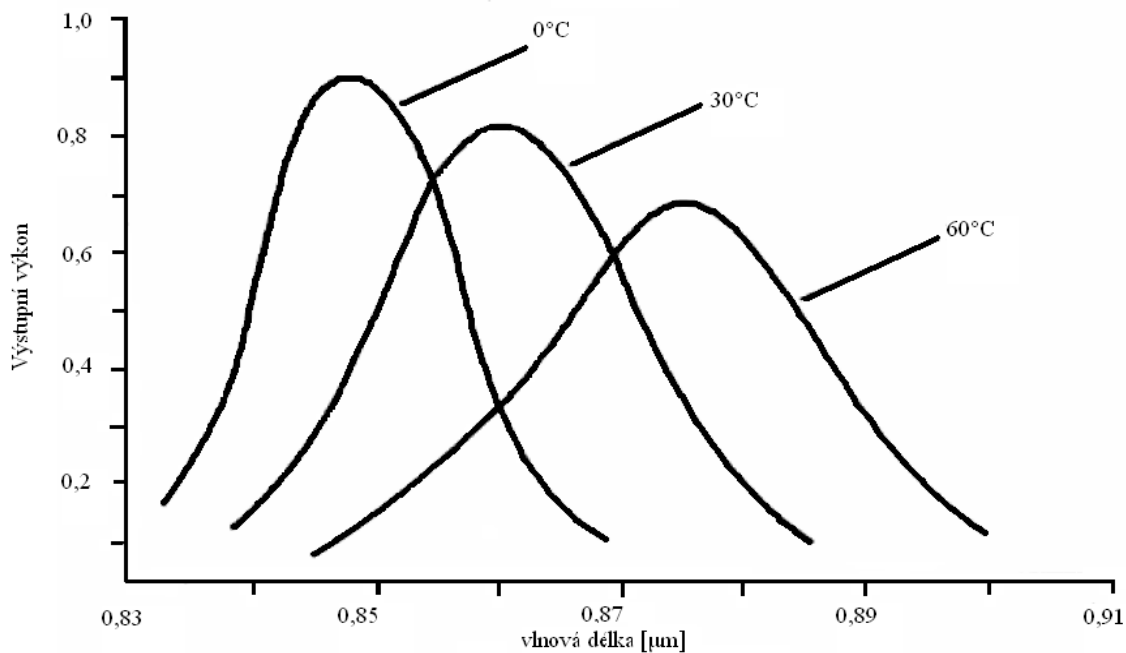
Rekombinace jsou pochody, kdy volné elektrony ztrácejí energii a dostávají se na oběžné dráhy v atomech. Rekombinuje-li elektron s dírou, odevzdává atom energii zhruba rovnou šířce zakázaného pásu. Při rekombinaci každého páru elektron – díra se uvolní určité kvantum energie, které se může buď vyzářit mimo krystal, nebo být absorbováno v mříži, což se projeví zvýšenou teplotou krystalu.

Vlnová délka energie vyzařené ve formě fotonu je dána rozdílem energií nosiče elektrického náboje před a po rekombinaci (šířce zakázaného pásu). Čím větší je energie, tím má vyzařovaný světelný paprsek kratší vlnovou délku.

Světelné záření opouští destičku ve všech směrech, které jsou pro něj průhledné. V oblasti středních proudů je svítivost LED přímo úměrná hustotě proudu v polovodiči. Pravděpodobnost zářivé rekombinace roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. U křemíku se šířkou zakázaného pásu 1,1 eV je uvolňovaná energie převážně absorbována v krystalu, ze kterého je odváděna přes pouzdro diody do okolního prostředí. Vyrobit – li diodu z GeAs, která má šířku zakázaného pásu 1,34 eV, bude již nezanedbatelná část energie rekombinace vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce, která však ještě spadá do oblasti neviditelného infračerveného záření. Kombinací tohoto materiálu s fosforem, tzv. galium arsenid fosfid, GaAsP, získáme již materiál, který, je-li z něj vytvořen PN přechod, vyzařuje červené viditelné záření. V tabulce 1 je znázorněna vlnová délka LED v závislosti na použitém materiálu a na obrázku 3 je závislost výstupního výkonu a vyzařované vlnové délky na teplotě.

materiál	vlnová délka [nm]	barva
GaAs	910-1020	IR (infra red)
GaAs _{0,35} P _{0,65}	632	červená
GaAs _{0,15} P _{0,85}	589	žlutá
GaP	570-700	zelená/červená
SiC	427	modrá

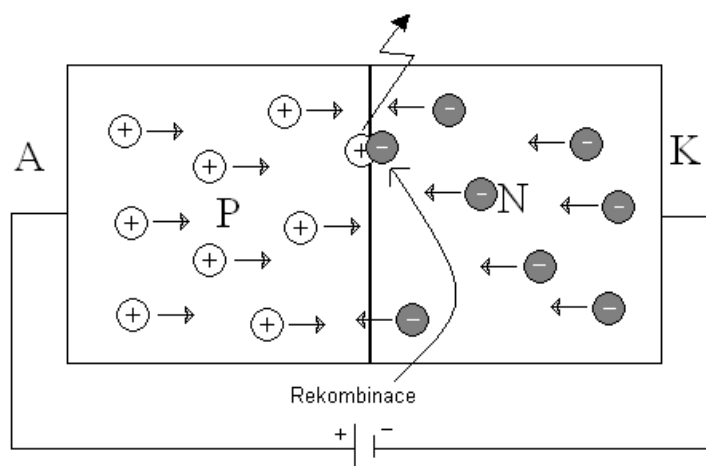
Tabulka 1: Pracovní vlnová délka LED v závislosti na použitém materiálu



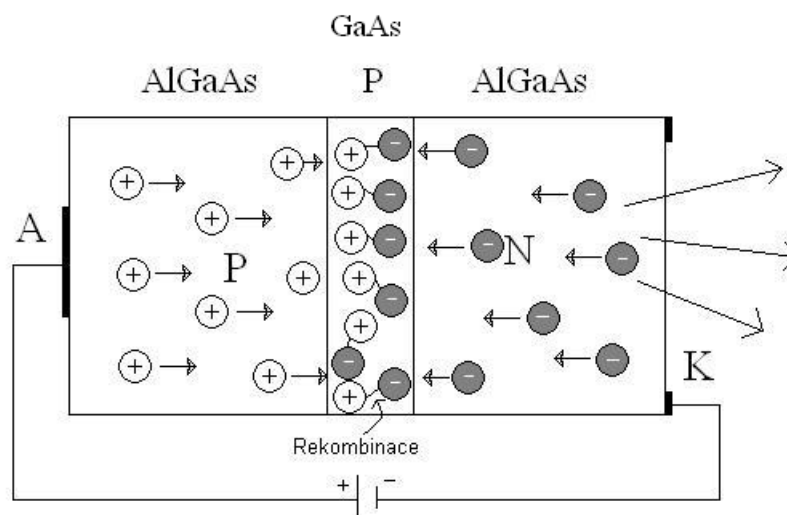
Obrázek 5: Závislost výstupního výkonu a vyzařované vlnové délky na teplotě.

2.3.2 Dva typy PN přechodů

- a) **Homogenní přechody** jsou nejjednoduššími typy přechodů, které jsou vytvářeny z jednoho typu materiálu na obou stranách dotovaného příměsemi P a N. Diody s homogenním přechodem byly první, které byly vyvinuty. Využívají částečně průhledný materiál jako je galium arsenid (GaAs) (obr. 2)
- b) **Heterogenní přechody** se skládají ze dvou různých polovodičových materiálů jako např. GaAs a AlGaAs, viz obr. 3, který zobrazuje tzv dvojitou heterostrukturu. Heterogenní přechody obsahují více přechodů PN a jsou výkonnější než diody s homogenním přechodem, složitější a dražší. Jejich využití je význačné zejména u laserových diod [2].



Obrázek 6: Princip diody LED, homogenní přechod



Obrázek 7: Příklad LED s heterogenním přechodem

Nevýhody luminiscenčních diod jsou malý výstupní výkon a široká optická spektrální šířka pásma, která není vhodná pro vysokorychlostní komunikace. Ačkoli LED diody byly široce používány v nízko rychlostních komunikacích jako alternativa laseru díky svým zřetelným výhodám, kterými jsou jednodušší výroba, cenová dostupnost, vysoká spolehlivost, menší teplotní závislost, jednodušší řídicí obvody a vyšší linearita.

Luminiscenční diody pracující ve viditelné oblasti, nazývané také svítící diody, pokrývají celé viditelné pásmo. Nejdříve byla z hlediska časové posloupnosti vývoje zvládnuta výroba červených diod, které pracují v širokém rozsahu červených barev (630 nm až 700nm). Zelené svítící diody byly donedávna realizovány na GaP a svítily v oblasti 565 nm až 570 nm

v barvě bledě zelené. V současné době jsou na trhu diody na bázi GaInN sytě zelené (525 nm) s vysokou svítivostí až 6 cd při úhlu vyzařování 15°.

2.3.3 Princip laserové diody (LD)

Laser je zařízení určené ke generování monochromatického (jednobarevného) optického záření. Název pochází z počátečních písmen dlouhého anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of Radiation, což by se dalo přeložit jako zesílení optického záření pomocí vynuceného (stimulované) emise záření, český název kvantový generátor optického záření není používán.

Existuje značné množství laserů, ale jen některé z nich jsou vhodné pro použití v telekomunikační sdělovací optice. Z důvodu velikosti, váhy a možnosti integrace s dalšími komponentami se dnes v telekomunikační praxi používají výhradně polovodičové lasery. Tyto lasery se dají dělit podle celé řady kritérií, kde jedním z nich je např. vidová struktura a s ní úzce související spektrální charakteristika laseru. Každý laser obsahuje optický aktivní (ziskovou) oblast, která v tomto případě funguje jako optický rezonátor, ten obecně umožňuje, aby v něm vzniklo optické pole (záření) ve formě více optických vidů, kde každý takový vid je charakterizován svým specifickým rozložením pole v rezonátoru.

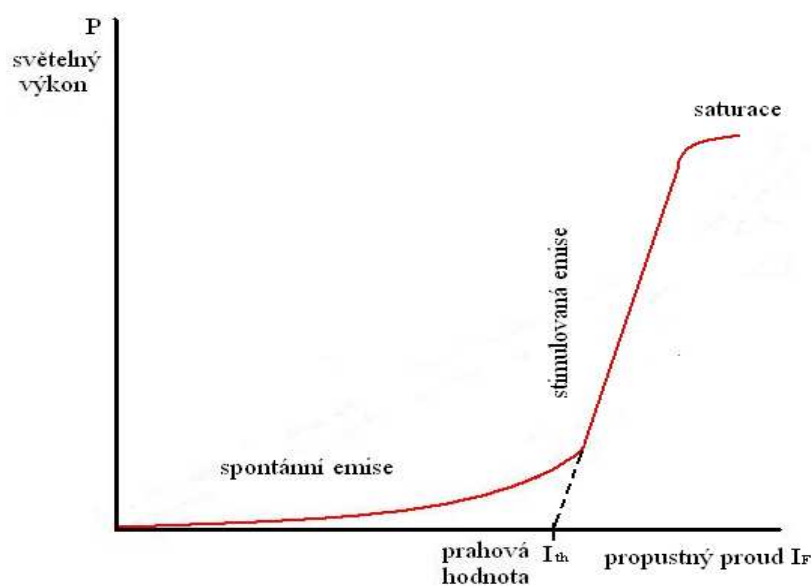
Lasery jsou optické oscilátory, tedy zařízení generující optické záření. Jejich princip je obdobný oscilátorům, používaným v elektronice. Tvoří je optický zesilovač se zpětnou vazbou. Protože se touto zpětnou vazbou zavádí do systému optické záření, tvoří ji optické prvky – zrcadla. Pro vznik oscilací je třeba splnit dvě podmínky, známe z elektroniky.

- Zisk zesilovače musí být větší než ztráty systému zpětné vazby, takže při jednom oběhu smyčky zpětné vazby se dosahuje čistého zisku.
- Celková změna fáze při jednom oběhu zpětné vazby musí být celočíselný násobek 2π .

Laserové optické záření je monochromatické (jednobarevné), koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). Koherence znamená, že je zachována fáze a směr nemění se s časem. Jinak řečeno, fotony se pohybují jedním směrem a jsou v průřezu velmi rovnoměrně rozmístěny. Koherence optického záření znamená jeho dobrou definovanost a uspořádanost. Na rozdíl od spontánní emise optického záření využívané u LED diod je u laserových diod využívána tzv. stimulovaná (vynucená, indukovaná) emise optického záření. Ta spočívá v tom, že dopadá-li do soustavy na atom kvantum energie, která je rovna energetickému rozdílu uvažovaných hladin a je-li přitom atom na vyšší energetické hladině, dopadající kvantum se

nepohlí, ale výsledkem jsou dvě kvanta světelné energie – optického záření o dvojnásobné energii. Za určitých podmínek je možné využít stimulovanou emisi k zesilování optického záření. V běžných podmínkách (v termodynamické rovnováze) probíhá v látce, do níž je přiváděna energie, jak stimulovaná tak i spontánní [2].

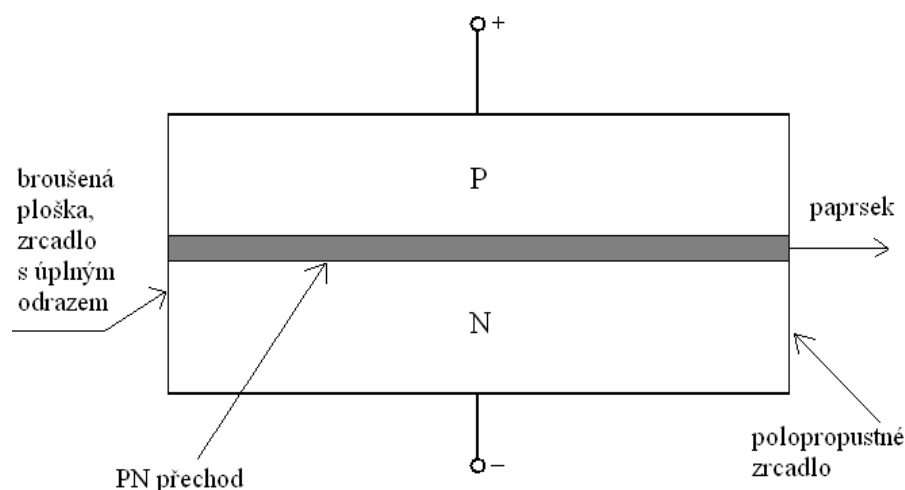
Jednou z důležitých charakteristik laserové diody je závislost jejího optického výkonu na procházejícím proudu, **Watt-Ampérová** označovaná jako **L-I charakteristika**. Připojíme-li k laserové diodě zdroj napájecího napětí a budeme postupně zvětšovat velikost proudu v propustném směru I_F , bude se dioda zpočátku chovat jako LED, laserová dioda vykazuje spontánní emisi. Má přitom malou intenzitu záření a široké, nemonochromatické optické záření. Překročí-li velikost proudu I_F prahovou hodnotu I_{th} (th – threshold), přejde dioda náhle do režimu stimulované emise. Pro činnost laserové diody je proto nutné, aby diodou tekla proud větší než I_{th} . V tomto režimu se intenzita vyzařovaného optického záření začne prudce zvětšovat a spektrální charakteristika se podstatně zúží. L-I charakteristika laserové diody je znázorněna na obrázku 8.



Obrázek 8: L-I charakteristika laserové diody

Princip konfigurace malovýkonové homogenní laserové diody je zřejmý z obrázku 9. Koherence se dosahuje použitím optického rezonátoru, který zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitým kmitočtem a definovanou fází, čímž vzniká stojaté vlnění. Stupeň koherence je dán kvalitou rezonátoru.

Optickým rezonátorem rozumíme oblast obklopenou odrazovými plochami, v níž je pasivní dielektrické prostředí. Nejjednodušším a u polovodičových laserů častým příkladem optického rezonátoru je soustava dvou rovnoběžných rovinných zrcadel obdélníkového tvaru v určité vzdálenosti proti sobě viz. obrázek 9.

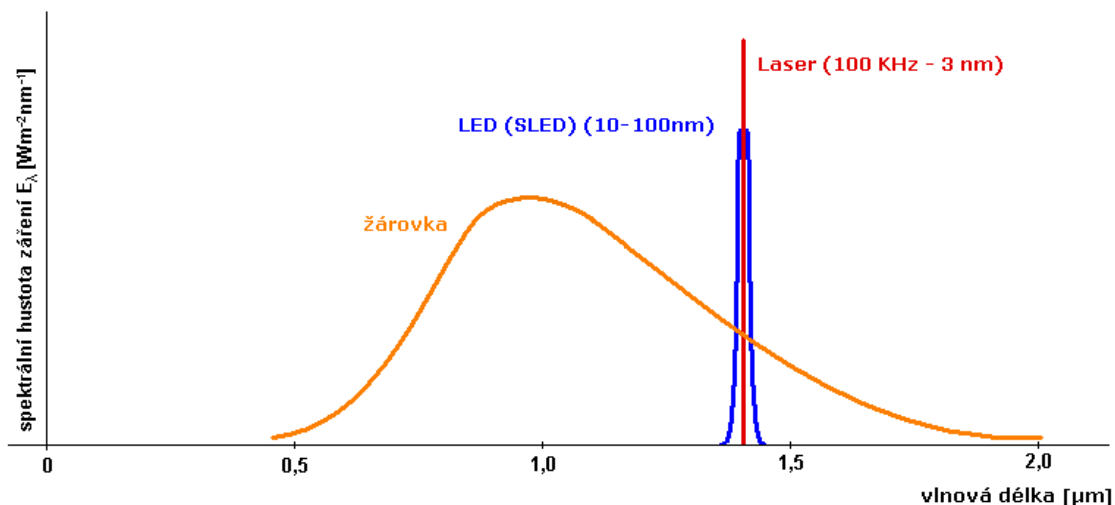


Obrázek 9 Princip laserové diody s homogenním přechodem

Pro dosažení vysoké účinnosti je zpravidla u laserových diod využívána dvojitá heterostruktura. Ta spočívá v tom, že mezi vrstvy AlGaAs je vložena vrstva GaAs. Vznikají tak dva PN přechody mezi různými materiály. Struktura uspořádání laserové diody umožňuje, že je vyslán pouze úzký svazek paprsků.

Světelný paprsek laserové diody má téměř koherentní vlastnosti. Optické záření z laserové diody obsahuje podstatně užší spektrum kmitočtů a je tedy více monochromatické než spektrum LED. Typická šířka spektra laserové diody se pohybuje kolem 1nm (od desetin nm do jednotek nm). I když je její spektrum velmi úzké, není na rozdíl od klasických laserů, jako např. helium-neonových, dokonale monochromatické.

Hlavní rozdíl mezi LED a LD je v tom, že LD vykazuje na svém výstupu podstatně větší optické výkony než LED a její spektrální čistota (koherence) je o několik řádů vyšší. Spektrální čistotou máme na mysli jaké vlnové délky LED nebo LD zabírají ve spektru. LED zabírají širší pásmo od své jmenovité vlnové délky na rozdíl od LD diod. Pro vysokorychlostní přenos v komunikacích, rychlejší než 10 Gbit/s nemohou být lasery použity s přímou modulací, ale mohou být použity s externími modulátory jako elektro-absorbní modulátor a mach-zahnderův modulátor. Důsledkem by tedy optické zdroje měly být vybírány důkladně vzhledem k užívané oblasti [2].



Obrázek 10: Spektrum optických zdrojů záření

2.4 Vlastnosti optických vysílačů

Hlavními výhodami těchto systémů jsou především:

- velká přenosová rychlost a kapacita komunikačních kanálů
- stále poměrně prázdná spektrální oblast pro provoz
- možnost využití systémů WDM (Wavelength Division Multiplexing)
- u optovláknových systémů prakticky nulové vyzařovací energie do okolí
- směrovost atmosférických optických spojů vylučuje vzájemnou interferenci spojů

Dvě základní kategorie optických vysílačů dělíme podle použitého optického zdroje a to buďto s použitím LED nebo laserové diody. Ačkoli použití LED je omezené ve srovnání s laserem, může to být účinná alternativa pro přenos na kratší vzdálenosti s menší kapacitou.

2.4.1 Používané metody modulací

Pro modulaci laseru se v dnešní době využívá dvou základních principů:

Přímá modulace laserové diody: V takovémto zařízení je pro modulaci záření použito řízení hodnoty injekčního proudu. Rychlost dosažitelná s využitím tohoto principu lze technicky řešit maximálně asi to jednotek GHz.

Modulace konstantního optického toku vnějším optickým modulátorem: Laserová dioda je buzena pro konstantní výstupní optický výkon. Modulaci technicky řeší samostatný blok vnějšího modulátoru s možností pracovat na frekvencích až desítek GHz.

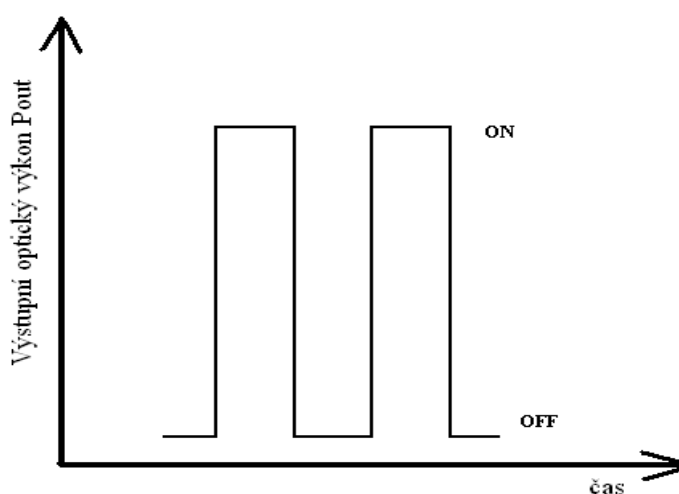
Optické komunikační systémy lze rozdělit podle toho, jakou optickou veličinu moduluje přenášená zpráva:

Modulace pole: Optická vlna představuje nosnou vlnu vysoké frekvence. Podobně jako na nižších frekvencích označujeme modulační systémy podle toho, dochází-li k modulaci amplitudy (AM), fáze (PM) nebo frekvenční modulace (FM). Díky vysoké frekvenci a vysoké koherenci nosných optických vln je v principu možné přenášet velké šířky pásma tj. přenášet značné množství informace.

Intenzitní modulace: Intenzitu optického záření (výkon) můžeme měnit v souladu s tím, jak je při kódování přenášené informace modulována amplituda pole. Přitom oscilace nosné optické vlny nejsou procesem modulace a demodulace nijak ovlivněny. Ve vysílači se mění pouze výkon, který je detekován v přijímači.

Protože modulace optického pole je prostým rozšířením modulačních postupů uplatňovaných v běžných rádiových a mikrovlnných komunikačních systémech do optického pásma, je její realizace z několika důvodů obtížnější. Vyžaduje zdroj záření, jehož amplituda, frekvence a fáze jsou stabilní a nepodléhají fluktuacím, což se v optické oblasti spektra dosahuje mnohem obtížněji než v oblasti radiových frekvencí.

V systémech, kde není podmínkou dosahování extrémně velkých přenosových rychlostí se používá tzv. modulace OOK značící ON-OFF KLÍČOVÁNÍ (viz obrázek 11). Modulovanou veličinou je intenzita pole.



Obrázek 11: "OOK" modulace

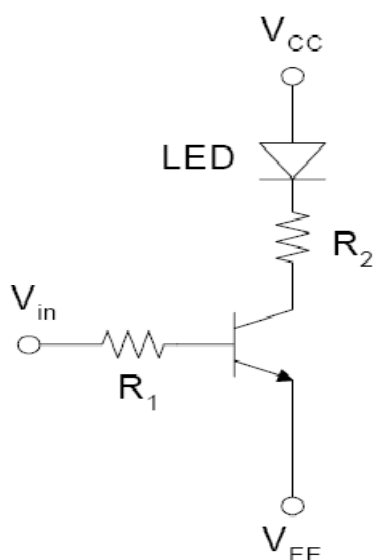
Některé materiály pod vlivem elektrického pole mění své optické vlastnosti. To je způsobeno silami, které ovlivňují polohy, orientaci nebo tvar molekul v látce. Elektrooptický jev je změna indexu lomu vzniklá působením stejnosměrného nebo nízkofrekvenčního elektrického pole. Pole přiložené k anizotropnímu elektrooptickému materiálu mění jeho indexy lomu a tedy i jeho působení na polarizované světlo. Závislost indexu lomu na přiloženém elektrickém napětí je dvojího druhu:

- index lomu se mění přímo úměrně přiloženému elektrickému poli. V tomto případě, se jev označuje jako lineární elektrooptický jev (Pockelsův).
- index lomu se mění úměrně druhé mocnině přiloženého elektrického pole a jev se nazývá kvadratický elektrooptický jev (Kerrův)

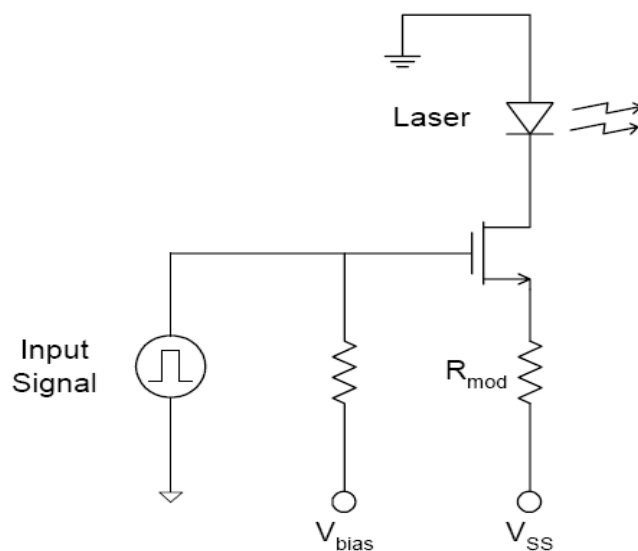
Změna indexu lomu je zpravidla velmi malá. Je-li ovšem dráha paprsku v látce mnohem delší než vlnová délka světla, může být vliv změny indexu lomu materiálu významný. Materiály, jejichž index lomu je možno pozměnit přiloženým elektrickým polem, lze využít v elektricky ovládaných optických zařízeních mnoha způsoby.

Fázové zpoždění samo o sobě neovlivní intenzitu světelného svazku. Fázový modulátor umístěný v jedné větvi interferometru může ovšem působit jako modulátor intenzity [5].

Pro OOK modulaci v digitálních přenosech jsou LED řízeny zapínacím a vypínacím proudem v rozsahu několika desítek až stovek mA. Běžná metoda využívající toto proudové spínání pracující s LED je na obrázku 12. Součástí tohoto schématu je bipolární tranzistor k zabezpečení dostatečného proudového zisku. V tomto obvodu je výstupní proud procházející LED nastaven hodnotou rezistoru R_2 .

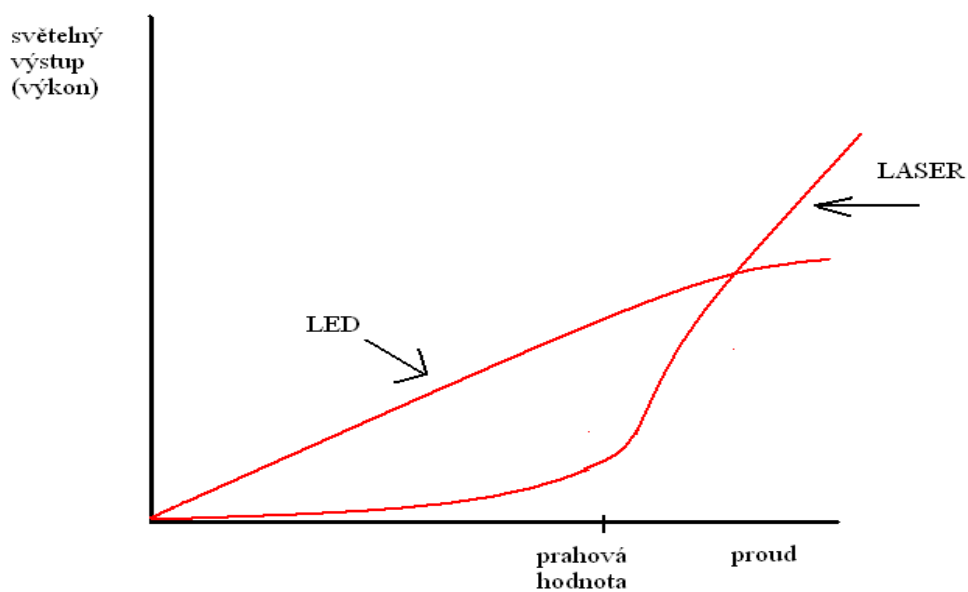


obr. 12 Řídící obvod s LED [převzato z 6]



obr.13 Řídící obvod s LD [převzato z 6]

Laserový vysílač znázorněný na obrázku 13 je poněkud odlišný od vysílačů používající LED, jak je zobrazeno na obrázku 14, světelný výstup je velmi malý, dokud proud nedosáhne prahové úrovně. Po dosažení prahové úrovně je optický výkon přibližně lineární s proudem. Problém spojený s typickými lasery je ten, že charakteristika křivky není lineární při vysokých hodnotách proudu. Jednoduchý řídicí obvod s užitím laserové diody je na obrázku 13. Mnoho typů řídicích obvodů bylo vyvinuto různou technologií v závislosti na oblast využití.



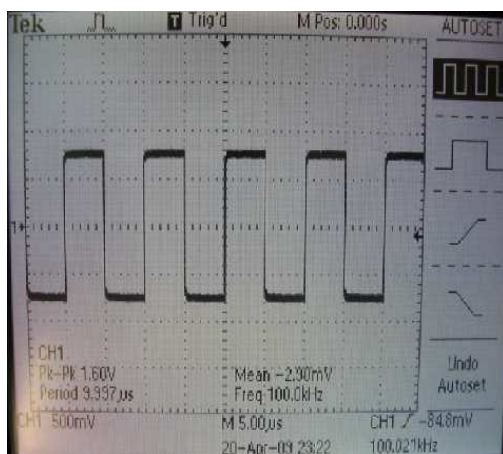
Obrázek 14 Závislost světelného výstupu LED a Laserové dioda na proudu

3 Návrh a realizace optického vysílače

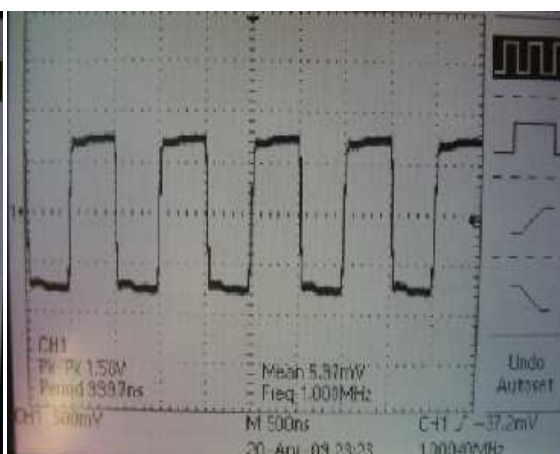
3.1 Návrh optického vysílače

Dle zadání diplomové práce měly být realizovány dva optické vysílače s přenosovou rychlostí 10 Mbit/s. Vysílač měl být realizován pomocí aktivních a pasivních součástek a měl obsahovat dvě hlavní části operační zesilovač a výkonový zesilovač. Celý návrh měl být nejdříve odzkoušen na nepájivém kontaktním poli a posléze realizován na plošný obvod.

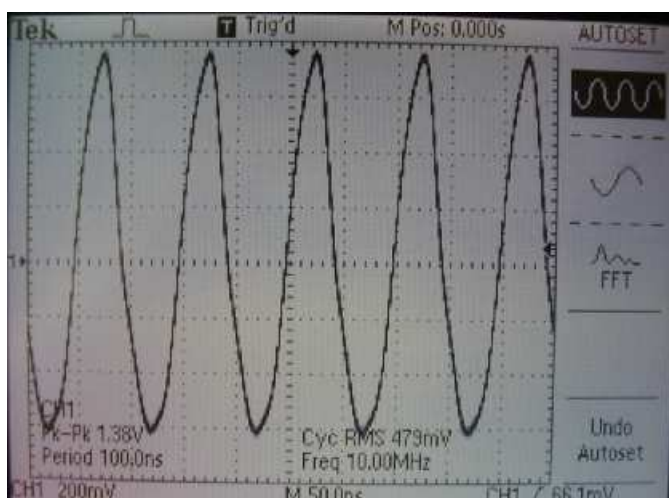
Vstupní signál pro navržený optický vysílač je reprezentován obdélníkovým signálem o kmitočtu 10 MHz, čemuž by odpovídala přenosová rychlost 10 Mbit/s. Jako zdroj signálu byl použit univerzální měřicí systém MS 9170. Jedná se o moderně řešený systém obsahující funkční generátor, čítač, multimetr a zdroj. Funkční generátor je vybaven průběhy: sinus, obdélník, trojúhelník a TTL (Transistor Transistor Logic) signál. Dvojitý zdroj s třetím doplňkovým pevným výstupem je možno použít v módu konstantní proud popřípadě konstantní napětí. Na obrázku 15, 16 a 17 jsou znázorněny průběhy obdélníkového signálu pro kmitočty 100kHz, 1MHz a 10MHz. Z obrázků je patrné, že pro první dva kmitočty je signál znázorněný na osciloskopu přesný a nezkreslený, jednoznačně lze rozpoznat, že se jedná o obdélníkový signál. U kmitočtu 10MHz je tento signál výrazně zkreslený a i samotný osciloskop ho vyhodnotil jako sinusový signál. Tento problém však nebyl předmětem řešením diplomové práce.



Obrázek 15: Signál z generátoru 100 kHz



Obrázek 16: Signál z generátoru 1 MHz



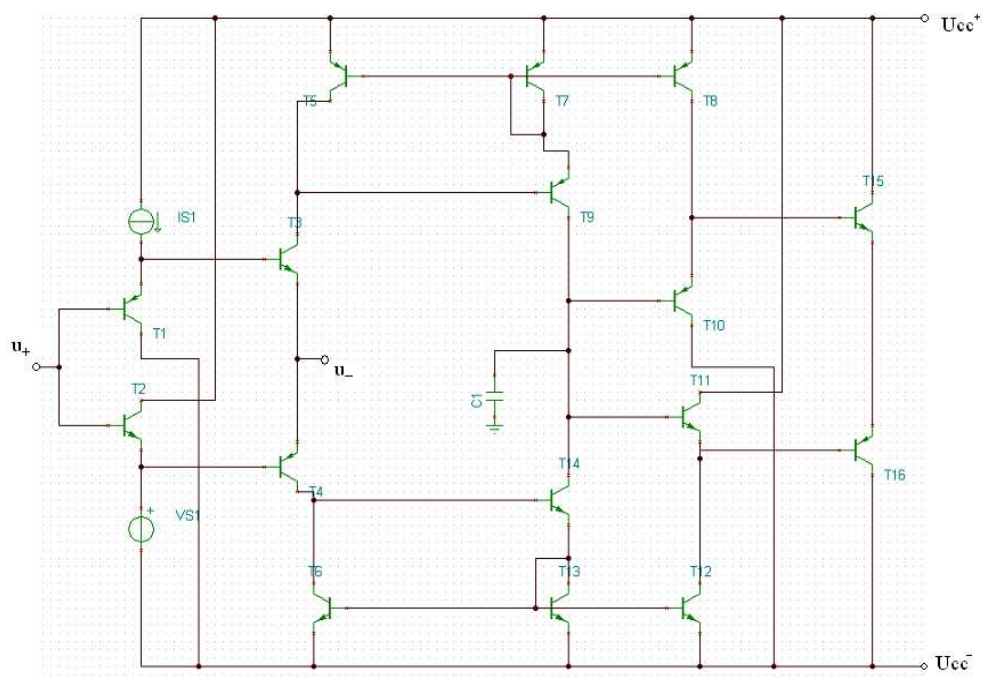
Obrázek 17: Signál z generátoru o kmitočtu 10 MHz

Jako vstupní velikost signálu byla nastavena hodnota 1 V. Vstupní signál měl být v první řadě přiveden přes oddělovací kondenzátor na operační zesilovač a zesílen na dostatečně velkou hodnotu, aby byl detekovatelný na straně přijímače. První problém, který se vyskytl, byla vhodná volba operačního zesilovače, jelikož běžně dostupné komerční zesilovače využívané v audio systémech nebyly schopny pracovat s kmitočty nad 1 MHz tak, aby na výstupu operačního zesilovače byl nezkrácený signál. Podle přiváděné frekvence signálu je patrné, že v zapojení bude kladen požadavek na minimální přechodnou dobu a tudíž na maximální rychlost přeběhu operačního zesilovače. Jde o velikost změny výstupního napětí, kterou dovede zesilovač udělat za jednu mikrosekundu. Čím větší je rychlost přeběhu, tím vyšší kmitočty dovede zesilovač zpracovávat. První prototyp optického vysílače obsahoval operační zesilovač CA3130, který pracoval dobře na kmitočtech do 100 kHz. S postupným zvyšováním kmitočtů však bylo zjištěno, že daný typ je zcela nevyhovující jelikož s kmitočty blížíící se k 1 MHz docházelo k značnému zkrácení signálu a velkému útlumu. Jako vhodná alternativa hlavně díky relativně vysoké rychlosti přeběhu, která je podstatná pro signály vyšších kmitočtů se jevila volba operačního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou LT 1252 od společnosti Linear Technology.

3.1.1 Volba operačního zesilovače

Zesilovače s proudovou zpětnou vazbou CFA (current feedback amplifier) mohou do jisté míry měnit nezávisle zisk a šířku pásma, jejich rychlost přeběhu není teoreticky omezena, frekvenční rozsah je značný. Vnitřní struktura operačního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou je na obrázku 18.

Těchto výhodných vlastností je dosaženo díky obvodovému uspořádání. Tranzistory struktury pracují spíše v „proudovém“ režimu, proto nejsou rozptylové kapacity podstatně zvětšovány díky Millerovu jevu. Vliv rozptylových indukčností, který by mohl zhoršovat dynamiku při proudových změnách, je v integrovaném obvodu zanedbatelný proti vlivu rozptylových kapacit. V tabulce 2 je základní srovnání operačních zesilovačů:



Obrázek 18: Zjednodušená struktura OZ s proudovou zpětnou vazbou

VLASTNOST		Napětový operační zesilovač	Nortonův zesilovač	Zesilovač s proudovou zpětnou vazbou
omezená rychlost přeběhu		ano	ano	teoreticky ne
frekvenční rozsah pro pokles zisku 3dB a velké zesílení		relativně malý pro invertující i neinvertující zapojení	relativně malý pro invertující zapojení relativně velký pro neinvertující zapojení (jednotky MHz)	velký pro invertující i neinvertující zapojení (až stovky MHz)
stejnoseměrné vlastnosti		dobré	špatné	dány konstrukcí vstupního sledovače
aplikační oblast		obecná	nízkofrekvenční a jednoduchá (levná) zapojení s nesymetrickým napájením	Vysoce kvalitní nf zesilovače, zesilovače až pro frekvence 100 MHz, rychlé zesilovače
vstupní odpor	neinvertujícího zesilovače	stovky $M\Omega$ pro bipolární a až $10^{12}\Omega$ pro FE zesilovače		dáno konstrukcí vstupního zesilovače
	invertujícího zesilovače			
Kapacitní vazba z výstupu na invertující vstup		je možná	je možná	nevhodná

Tabulka 2: Základní srovnání zesilovačů

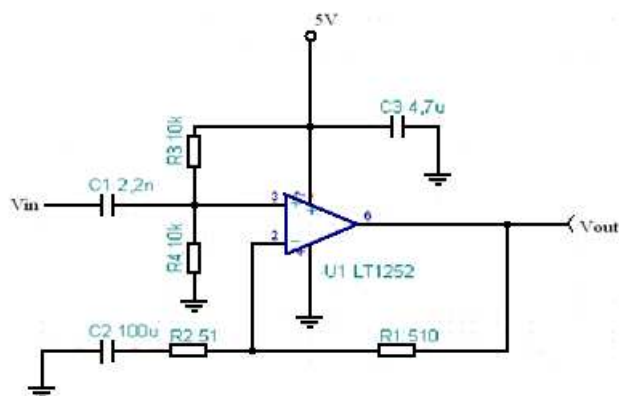
Požadavky, které klade na zesilovače telekomunikační technika, videotechnika a soudobé zpracování signálů obecně, nutí konstruktéry integrovaných obvodů k vývoji stále menších, méně ztrátových a stále rychlejších struktur. Aby byly současně dodrženy i přijatelné cenové poměry, vyvinulo několik společností komplementární bipolární technologii, která umožňuje vyrábět levné a přitom zdokonalené integrované operační zesilovače.

Tyto zesilovače se vyznačují rychlostí a šířkou pásma, které se zdály být před několika lety nedostižné – nebo byly dosažitelné u drahých hybridních integrovaných obvodů. Vlastnosti současných integrovaných monolitických operačních zesilovačů jsou natolik vynikající, že je opravdu lze používat ve videosystémech, pro frekvence až několik set MHz.

Zatímco některé z nových zesilovačů nabízejí především vysoké rychlosti přeběhu SR (Slew Rate) a velké f_T (tranzitní kmitočet), což je kmitočet na kterém klesne zesílení OZ na 0 dB, jiné vyhovují požadavkům na malou spotřebu energie. Tradičně platilo, že rychlý a širokopásmový zesilovač má i velký odběr proudu ze zdrojů. Takovéto zesilovače se příliš

nehodily do „bateriových“ aplikací, kde rozhoduje každý miliampér. Výrobci operačních zesilovačů však dnes dosáhli i toho, že spotřeba podstatně klesla, při zachování výborných dynamických vlastností [7].

Po detailním nastudování parametrů operačního zesilovače LT 1252, následovalo jeho vhodné zapojení na kontaktním poli. Díky katalogovým listům, byla tato záležitost bezproblémová. Schéma zapojení je na obrázku 19.



Obrázek 19: Schéma zapojení operačního zesilovače

3.1.2 Návrh výkonového zesilovače

Pro návrh výkonového zesilovače byl kladen požadavek na to, aby proud protékající LED nebo laserovou diodou byl přibližně 20 až 30 mA. Jelikož se jedná o buzení laserové diody, rozhodl jsem se použít tranzistor v tzv. Darlingtonově zapojení díky jeho vysokému proudovému zesilovacímu činiteli. Darlingtonovo zapojení je vlastně zapojení dvou bipolárních tranzistorů znázorněné na obrázku 20. Kolektor tranzistoru T1 můžeme spojit s kolektorem tranzistoru T2 nebo přímo zapojit na napájecí napětí, čímž dochází k eliminaci Millerova efektu. Pro proudy jednotlivých elektrod platí následující vztah:

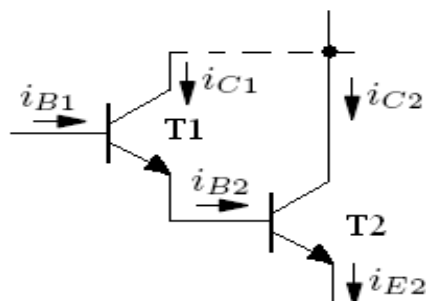
$$i_{B1}(B_{F1} + 1) = \alpha_{N2} i_{C1} = i_{E1} = i_{B2} = \frac{i_{C2}}{B_{F2}} \quad (2)$$

kde B_F je proudový zesilovací činitel

Pro celkový proudový zesilovací činitel můžeme tedy napsat

$$B_F' = \frac{i_C}{i_B} = \frac{i_{C2}}{i_{B1}} = B_{F2}(B_{F1} + 1) \doteq B_{F2}B_{F1} \quad (3)$$

Ze vztahu vyplývá, že celkový proudový zesilovací činitel je přibližně B_F – násobně větší, oproti jednomu tranzistoru. Proto se toto zapojení využívá zejména tam, kde požadujeme velké proudové zesílení.



Obrázek 20: Darlingtonovo zapojení s tranzistory NPN

Darlingtonovo zapojení se používá v případech, kdy vyžadujeme velmi stabilní a velké proudové zesílení. Je to v obvodech s velkou vstupní a malou výstupní impedancí. Často se používá i pro koncové zesilovací stupně. Darlingtonovo zapojení si lze představit jako jeden tranzistor, pracující v zapojení SE (společný emitor), SB (společný báze) nebo SC (společný kolektor). Velmi často je používané zapojení se společným emitorem, které je využito i v tomto návrhu vysílače. Výhodou tohoto zapojení je velký vstupní odpor způsobený malým proudem prvního tranzistoru, velkou strmostí danou kolektorovým proudem druhého tranzistoru a velkým proudovým zesilovacím činitelem, daným přibližně součinem dílčích proudových zesilovacích činitelů jednotlivých tranzistorů. Konkrétní typ Darlingtonova tranzistoru, který je součástí návrhu je tranzistor NPN BC 517 [8].

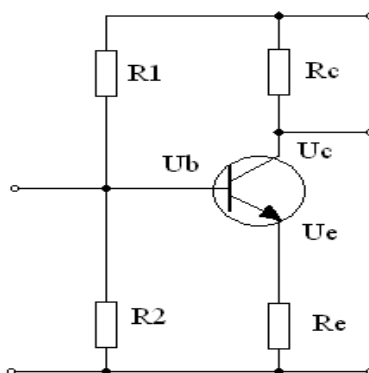
3.1.3 Volba pracovního bodu

Jestliže chceme, aby zesilovač zesiloval bezchybně, to je bez zkreslení, musíme zajistit jeho správné nastavení pracovního bodu. Tranzistorem protéká určitý kolektorový proud i v klidu. Nastavení spočívá v určení správného kolektorového proudu I_c a napětí U_c . Ve většině případů platí, že nejlépe nastavíme pracovní bod tak, že napětí na kolektoru odpovídá polovičce napětí zdroje.

Vlastní nastavení se provádí pomocí rezistoru R_c zapojeného v obvodu kolektoru. Při výběru velikosti tohoto odporu nám postačí znalost pouze základního ohmova zákona.

$$R[\Omega] = \frac{U[V]}{I[A]} \quad (4)$$

Zvolíme-li velký odpor R_c , pak nám postačí malý proud, abychom dosáhli potřebného napětí. Tato možnost má však i svou zápornou vlastnost. Malá amplituda proudu se může nepříznivě projevit při odebírání výstupního signálu. Následující stupeň je pak více zatěžován a dochází k většímu zkreslení. Zvolíme-li však menší odpor R_c , pak bude tranzistorem procházet větší proud, zesilovač se tedy bude více zahřívat. Napětí mezi kolektorem a emitorem velmi klesne. Tranzistor je pak zcela otevřen a nereaguje na zvětšování proudu báze, což způsobuje velmi velké zkreslení. Je zřejmé, že taková situace je nežádoucí, proto se do obvodu emitoru zařazuje rezistor R_e , který situaci řeší tak, že zvětší napětí v obvodu emitoru. Jediná veličina, která zůstala nezměněna je tedy napětí na bázi. Nedovolí to odporový dělič R_1 , R_2 . Jediné co takový dělič dovolí, je pokles proudu na bázi a toho jsme právě chtěli dosáhnout. Jakmile klesne proud procházející tranzistorem, nastává ochlazení tranzistoru a kolektorový proud nadále klesá. Tím zároveň klesá napětí na rezistoru R_e a vrací se na původní hodnotu. Odpor R_e tu vytvořil zápornou proudovou zpětnou vazbu. Pracovní bod tranzistoru se stabilizoval. Stabilizační metoda, která je zde popsána se nazývá můstková stabilizace. Její principiální zapojení je znázorněno na obrázku 21.



Obrázek 21: Schematické zapojení stabilizační metody.

Tímto by se dal návrh operačního a výkonového zesilovače považovat za uzavřený. V další fázi zbývalo tyto dva návrhy spojit a otestovat. Před samotným testováním na nepáživém poli jsem se rozhodl využít některý z volně dostupných simulačních programů a kompletní schéma oživit a doladit nejprve softwarově [9].

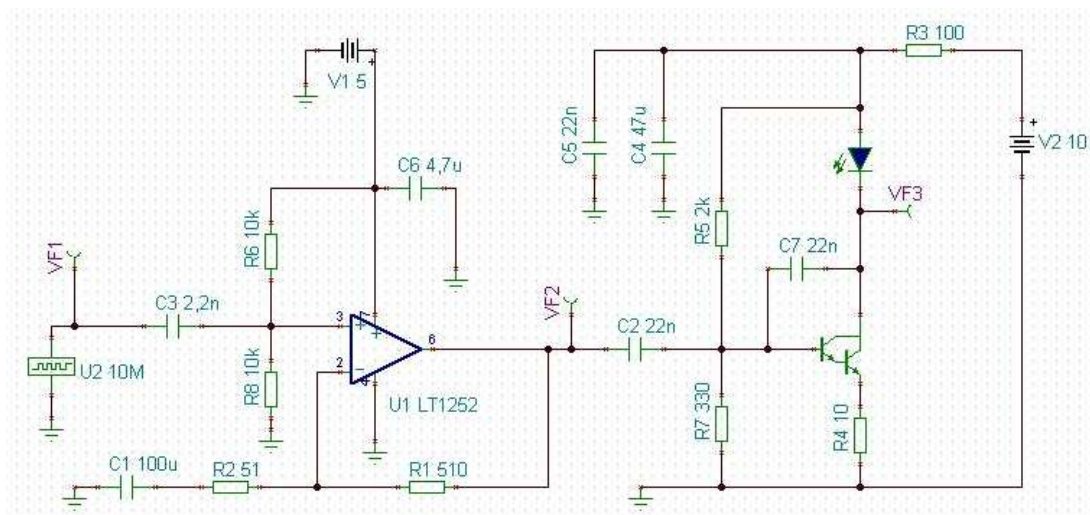
3.2 Simulace návrhu

Jako simulační aplikaci jsem chtěl použít program Micro-Cap, který se však ukázal jako nevyhovující. Jako alternativa byla tedy zvolena práce se simulačním programem Tina Pro, který byl jako časově omezená verze k dispozici na internetu. Tento software vykazoval pro

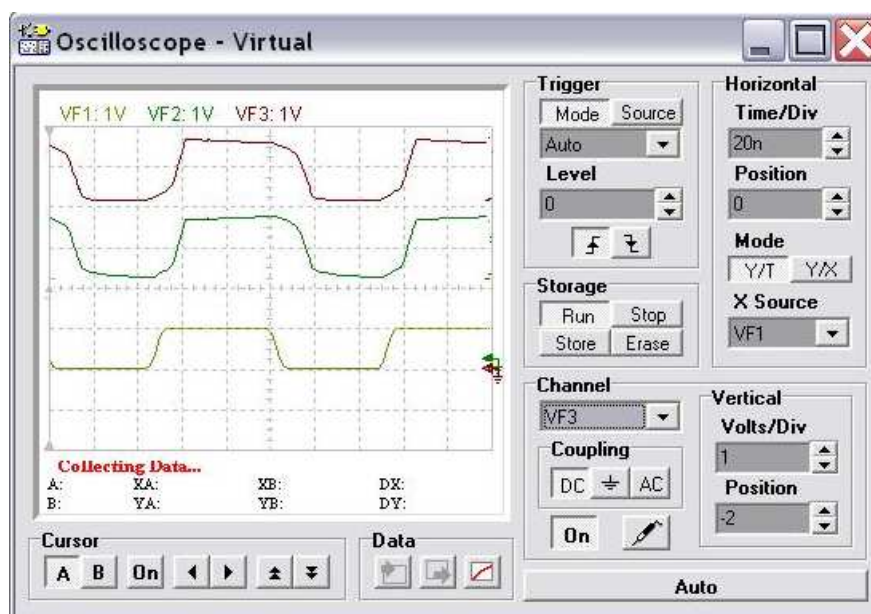
naše potřeby lepší vlastnosti než předchozí aplikace. Pro ověření funkčnosti programu jsem realizoval několik jednoduchých zapojení s rezistory, tranzistory a LED diody na plošném spoji a změřil velikosti úbytků napětí na rezistorech a hodnoty proudů ve větvích obvodů. Při porovnání odečtených hodnot na plošném spoji s výsledky ze simulačního programu jsem se ujistil, že program se dá považovat za spolehlivý.

Na obrázku 22 je konečné schéma optického vysílače, které je napájeno na plošném spoji. Tomuto schématu předcházelo několik dalších prototypů, které zde ale již nebudu ilustrovat. Změny vůči ostatním prototypům se především týkaly vhodné volby rezistorů a kondenzátorů obsažené ve schématu. Hlavní pozornost se kladla především na volbu rezistorů R3, R4, R5 a R7, které tvoří část výkonového zesilovače. Složitější práci s výpočty zde adekvátně nahradil simulační program, díky němuž se změny hodnot v použitých součástkách jevily okamžitě. Díky funkci osciloskop nám program umožní pohled na výstupní signál.

Na obrázku 22 jsou znázorněny napěťové piny VF1, VF2, VF3, které zobrazují na osciloskopu signál v daném bodě. Na pinu VF1 je znázorněn vstupní signál o velikosti 1V na pinu VF2 je zobrazen průběh signálu za operačním zesilovačem a na pinu VF3 je průběh signálu vstupující do LED diody popřípadě do laserové diody. Na obrázku 23 je prezentován průběh signálů ve všech zmíněných místech.



Obrázek 22: Schéma optického vysílače

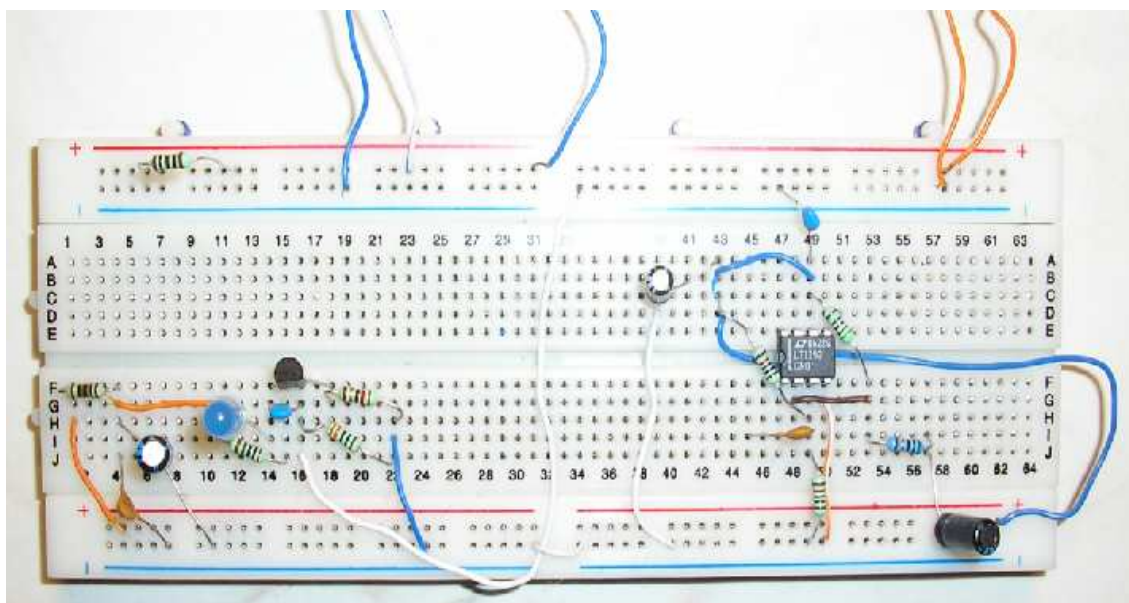


Obrázek 23: Průběhy signálů na daných výstupech

3.3 Realizace schématu

Z charakteristiky osciloskopu je patrné, že signál vstupující do laserové diody by měl být bez problémů detekovatelný na straně přijímače. Po provedení desítek simulací následovalo zapojení obvodu na nepájivé kontaktní pole. Pro sestavení obvodu byly použity klasické součástky, které jsou běžně k dostání v prodejnách místech s elektronikou. Jediný problém, který se vyskytl, byl nákup operačního zesilovače. Jelikož se nejednalo o běžně dostupný typ, muselo se zboží objednat a čekat na jeho dodání, což samotnou realizaci prototypu zpozdilo. Návrhy schémat, které byly realizovány na nepájivém poli, prošly řadou měření. Největší problémy, které se vyskytovaly, byly velké parazitní kapacity vzniklé na kontaktním poli, dále také přechodové odpory, ale také nepřiměřená délka použitých drátů pro přenos signálu. Tyto negativní jevy se značně podílely na celkovém zkreslení signálu.

Na obrázku 24 je znázorněno schéma na nepájivém kontaktním poli, na kterém proběhly prvotní měření s červenou LED diodou. Schéma je zapojeno bez generátoru signálu.



Obrázek 24: Schéma optického vysílače na nepájivém kontaktním poli

Signál byl detekovaný pomocí optického přijímače PDA10CS-ec, InGaAs amplified detector od společnosti Thorlabs, jehož výstup byl připojen na osciloskop. Přijímač byl navržen pro detekci světelných signálů v rozmezí 700 – 1800nm vlnové délky. Osmi-poziční rotační přepínač umožňuje uživateli měnit zisk v deseti dB (decibel) krocích. Výstupní impedance má hodnotu 50Ω, výstupní napětí pro stanovenou impedanci je maximálně 5V a maximální výstupní proud je 100 mA. Thorlabs PDA série je ideální pro měření impulsních a CW světelných zdrojů. Na obrázku 25 je obrázek popsaného přijímače [1].



Obrázek 25: Optický přijímač PDA10CS-ec

Při testování optického vysílače s červenou LED diodou jsme dokázali pracovat do frekvence asi 1 MHz na vyšších frekvencích již LED dioda nebyla schopna signál přenášet a

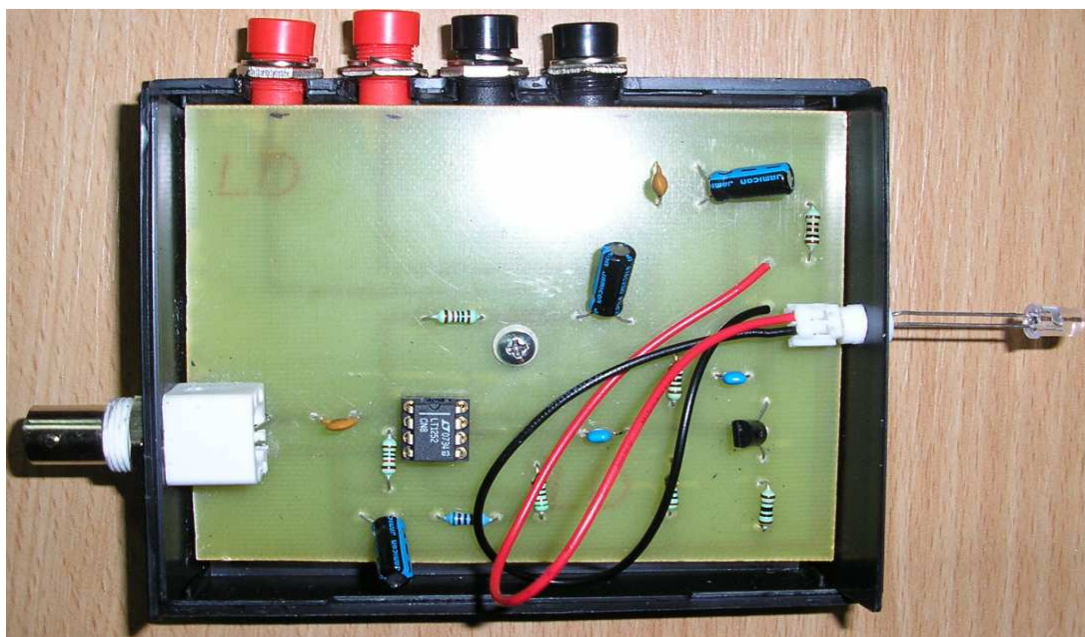
docházelo k jeho velkému útlumu. Jelikož jsme potřebovali vědět, zda signál vstupující do LED diody popřípadě laserové diody bude dostatečně velký k tomu, aby byl detekovatelný na straně přijímače a hlavně nezkreslený, vložili jsme na místo LED diody rezistor o hodnotě 100 ohmů. Signál na tomto odporu jsme připojili přímo k osciloskopu a postupně odečítali velikost jeho amplitudy na frekvencích 500kHz až 10MHz s kmitočtovým krokem 0,5 MHz. Prvotní měření na nepájivém kontaktním poli probíhali s červenou LED diodou, s laserovou diodou LD-505A a na rezistoru o odporu 100Ω. Velikosti amplitudy signálů jsou znázorněny v následující tabulce.

měření na odporu 100 Ω		Led červená		LD-505A	
f[MHz]	Pk-Pk [V]	f[kHz]	Pk-Pk [mV]	f[MHz]	Pk-Pk [mV]
0,05	4,6	5	616	5	180
0,2	5,28	20	632	20	192
0,5	6,8	50	580	50	200
1	4,72	100	632	100	210
1,5	4	150	632	150	202
2	3,64	200	592	200	192
2,5	3,52	250	540	250	178
3	3,4	300	488	300	164
3,5	3,64	350	436	350	154
4	3,24	400	392	400	142
4,5	3,5	450	348	450	140
5	3,12	500	325	500	140
5,5	3,24	550	306	550	137
6	3,44	600	290	600	130
6,5	3,4	650	276	650	118
7	3,24	700	262	700	108
7,5	3,2	750	250	750	98
8	3,12	800	234	800	90
8,5	3,08	850	224	850	85
9	3,24	900	214	900	80
9,5	3,64	950	206	950	76
10	3,6	1000	190	1000	74

Tabulka 3: Naměřené hodnoty na nepájivém kontaktním poli

Naměřené hodnoty na rezistoru vypovídaly o tom, že navržený vysílač by s ideálně zvolenou laserovou diodou popřípadě LED diodou měl přenášet signál až do velikosti 10 MHz a to s takovou velikostí amplitudy, která bude detekovatelná na straně přijímače. Po prvotních, měření jsme mohli přistoupit k samotné výrobě optického vysílače a schéma realizovat na plošný spoj.

Plošný obvod byl vyleptán amatérsky pomocí chloridu železitého (FeCl_3), mikrovrtáčky a mikropájky na cuprexitu o velikosti 10 x 13 cm a následně usazen do krabičky KM-25. Na plošný obvod byly napájeny vstupní konektory pro napájení operačního zesilovače a budící napětí pro LED diodu. Vstupní signál je přiveden do optického vysílače přes BNC konektor. Obrázek optického vysílače je na obrázku 26 a 27.



Obrázek 26: Optický vysílač s přenosovou rychlostí 10Mbit/s bez horního krytu



Obrázek 27: Optický vysílač uzavřený v krabičce KM-25

4 Provedená měření

4.1 Měření signálu pomocí laserové diody

Než jsme přistoupili k samotnému měření dle zadání diplomové práce testovali jsme dva zdroje záření, abychom zjistili, který z nich lépe vyhovuje navrženému obvodu. První z nich byla laserová dioda s označením LD 505A pracující na vlnové délce 650 nm, což je v oblasti viditelného spektra od společnosti Roithner LaserTechnik. Její základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.

POPIS	SYMBOL	HODNOTA			
Optický výkon (mW)	PO	5			
Provozní teplota (°C)	Top	-10 až +50			
Skladovací teplota	Tstg	-40 až +85			
LD závěrné napětí	VLDR	2			
PD závěrné napětí	VPDR	30			
POPIS	SYMBOL	MINIMUN	TYPECKÉ	MAXIMUM	TESTOVČÍ PODMÍNKA
vlnová délka (nm)	λ_p	645	655	665	Po=5mW
prahový proud (mA)	I _{th}	15	25	35	Po=5mW
pracovní proud (mA)	I _{op}	20	30	45	Po=5mW
pracovní napětí (V)	V _{op}	2,0	2,4	2,7	Po=5mW

Tabulka 4: Základní vlastnosti LD 505A

Měření probíhalo obdobným způsobem, jak tomu bylo v případě měření rezistoru na kontaktním poli. Laserovou diodu jsme připojili na výstup optického vysílače způsobem, kterým je připojena LED dioda na obrázku 28. Optický vysílač byl napájen přímo z generátoru signálu. První vstup je určený pro napájení operačního zesilovače, jehož napájecí hodnota činila 5V. Druhý vstup je určený pro napájení zdroje záření, tuto hodnotu nastavujeme dle katalogových listů. Jelikož testovaná dioda nepotřebovala příliš velkou hodnotu napájecího napětí, upravili jsme jeho velikost dle specifikace diody pomocí nastavitelného zdroje napětí. Vysílač byl umístěn na podstavci a zaaretován proti nežádoucímu posuvu. Přijímač byl obdobným způsobem upevněn laboratorním úchytem. Dioda byla umístěna ve vzdálenosti asi 2 cm od přijímače a nastavena tak, aby světelný tok směřoval přímo do středu optického detektoru. Z optického přijímače byl signál přivedený na osciloskop pomocí BNC kabelu. Celý zapojený systém je vyobrazený na obrázku 29.

Veškerá měření jsme opakovali celkem 5 krát, pro ověření odečtených hodnot. V tabulce 5 jsou znázorněny odečtené hodnoty amplitudy signálu měřeného na rezistoru o velikosti 100Ω, tentokrát ale již na plošném spoji. Nejnižší hodnota frekvence, která byla odečtena z osciloskopu měla 50kHz. Pro tuto hodnotu byl signál výrazně zkreslený, a proto jsou hodnoty podbarveny červeně. V krajním pravém sloupci jsou spočítány aritmetické průměry naměřených hodnot pro všechny frekvence. Z uvedených hodnot vyplývá, že amplituda signálu se nijak výrazně nemění s rostoucí frekvencí. Při porovnání hodnot naměřených na nepájivém kontaktním poli s hodnotami změřenými na plošném spoji je patrné, že jsme docílili zvýšení amplitudy přibližně o 2 volty, což je hodnota, která je ve výsledku pozitivní. Z těchto naměřených hodnot se dalo usoudit, že navržený obvod je stabilní a provozuschopný.

	1. měření		2. měření		3. měření		4. měření		5. měření	
f [MHz]	Pk-Pk [V]	f [MHz]	Pk-Pk [V]	f [MHz]	Pk-Pk [V]	f [MHz]	Pk-Pk [V]	f [MHz]	Pk-Pk [V]	Σ/5 [V]
0,05	5	0,05	4,88	0,05	4,92	0,05	4,92	0,05	4,92	4,928
0,2	5,32	0,2	5,4	0,2	5,32	0,2	5,24	0,2	5,24	5,304
0,5	5,9	0,5	5,88	0,5	5,92	0,5	5,96	0,5	5,88	5,908
1	5,4	1	5,52	1	5,52	1	5,52	1	5,52	5,496
1,5	5,44	1,5	5,36	1,5	5,36	1,5	5,32	1,5	5,32	5,36
2	5,44	2	5,32	2	5,36	2	5,4	2	5,28	5,36
2,5	5,6	2,5	5,64	2,5	5,56	2,5	5,64	2,5	5,6	5,608
3	5,4	3	5,44	3	5,44	3	5,44	3	5,16	5,376
3,5	5,4	3,5	5,36	3,5	5,4	3,5	5,4	3,5	5,48	5,408
4	5,44	4	5,56	4	5,6	4	5,56	4	5,44	5,52
4,5	4,76	4,5	4,8	4,5	4,72	4,5	4,8	4,5	4,88	4,792
5	5,16	5	5,52	5	5,12	5	5,28	5	5,32	5,28
5,5	5,28	5,5	5,2	5,5	5,24	5,5	5,2	5,5	5,24	5,232
6	5,6	6	5,64	6	5,52	6	5,64	6	5,72	5,624
6,5	5,88	6,5	5,92	6,5	5,88	6,5	5,84	6,5	5,84	5,872
7	5,24	7	5,12	7	5,2	7	5,28	7	5,2	5,208
7,5	5,12	7,5	5,16	7,5	5,16	7,5	5,16	7,5	5,16	5,152
8	5,08	8	5,12	8	5,12	8	5,12	8	5,12	5,112
8,5	5,08	8,5	5,04	8,5	5,04	8,5	5,04	8,5	5,04	5,048
9	5,08	9	5,04	9	4,96	9	4,96	9	4,96	5
9,5	5,2	9,5	5,16	9,5	5	9,5	4,96	9,5	4,96	5,056
10	5,32	10	5,32	10	5,32	10	5,4	10	5,32	5,336
Σ/10	5,324545		5,336364		5,303636		5,321818		5,3	

Tabulka 5: Odečtené hodnoty na rezistoru 100Ω



Obrázek 28: Připojení LED diody na optický vysílač



Obrázek 29: Zapojení pracoviště pro měření signálu

Po otestování měření na rezistoru jsme přistoupili k měření laserové diody. Výsledky měly opět být velikosti amplitudy odečtené z osciloskopu. Velikosti amplitud jsme začali odečítat od hodnoty 5 kHz a postupovali postupným zvyšováním frekvence. Vstupní signál byl nastavený na hodnotu 1V. První odečtená hodnota (v tabulce podbarvená červeně) odpovídá frekvenci 5 kHz, při tomto kmitočtu byl signál ale výrazně zkreslen a byl jen velice obtížně detekovatelný jako obdélníkový signál. Z tabulky je patrné, že s rostoucí frekvencí přenášeného signálu klesá amplituda. Nejvyšší kmitočet signálu, detekovatelný přijímačem byl 2,1 MHz. Velikost amplitudy na tomto kmitočtu byla průměrně pouhých 16,6 mV, což je pro další měření nedostačující. Při vyšších kmitočtech již přijímač nedokázal signál vůbec detekovat. V tabulce 6 jsou hodnoty odpovídající měření s laserovou diodou LD 505A

1. měření		2. měření		3. měření		4. měření		5. měření		
f[kHz]	Pk-Pk [mV]	f[kHz]	Pk-Pk [mV]	f[kHz]	Pk-Pk [mV]	f[kHz]	Pk-Pk [mV]	f[kHz]	Pk-Pk [mV]	$\Sigma/5$ [mV]
5	2480	5	2400	5	2520	5	2560	5	2600	2512
20	2640	20	2720	20	2680	20	2760	20	2800	2720
50	2600	50	2560	50	2640	50	2560	50	2560	2584
100	2040	100	1960	100	1920	100	1880	100	1920	1944
150	820	150	800	150	870	150	760	150	780	806
200	160	200	156	200	152	200	160	200	152	156
250	152	250	148	250	144	250	148	250	148	148
300	168	300	164	300	172	300	160	300	164	165,6
350	200	350	192	350	184	350	194	350	184	190,8
400	168	400	176	400	176	400	176	400	160	171,2
450	124	450	120	450	124	450	120	450	124	122,4
500	108	500	112	500	104	500	112	500	104	108
550	104	550	100	550	96	550	104	550	100	100,8
600	84	600	88	600	80	600	84	600	92	85,6
650	76	650	72	650	68	650	72	650	76	72,8
700	60	700	68	700	64	700	60	700	64	63,2
750	61	750	52	750	55	750	54	750	55	55,4
800	56	800	48	800	50	800	52	800	52	51,6
850	52	850	45	850	46	850	46	850	45	46,8
900	48	900	41	900	43	900	44	900	42	43,6
950	42	950	38	950	40	950	40	950	39	39,8
1000	40	1000	35	1000	37	950	38	950	38	37,6
1100	35	1100	32	1100	33	950	33	950	32	33
1200	32	1200	29	1200	30	950	32	950	30	30,6
1300	27	1300	28	1300	27	950	27	950	28	27,4
1400	26	1400	25	1400	25	950	25	950	25	25,2
1500	23	1500	23	1500	24	950	23	950	23	23,2
1600	20	1600	22	1600	22	950	22	950	20	21,2
1700	20	1700	20	1700	20	950	20	950	20	20
1800	19	1800	19	1800	20	950	20	950	19	19,4
1900	19	1900	18	1900	19	950	19	950	18	18,6
2000	17	2000	16	2000	18	950	17	950	18	17,2
2100	16	2100	17	2100	17	950	16	950	17	16,6

Tabulka 6: Změřené hodnoty pomocí laserové diody LD 505A

Jelikož máme realizovat optický vysílač s přenosovou rychlostí 10 Mbit/s čemuž odpovídá vstupní signál 10 MHz, byla by ostatní měření realizovaná pomocí této diody nevyhovující. Daná dioda by měla zvládat přenos signálů i s touto frekvencí, ale s největší pravděpodobností daný obvod nevyhovuje impedančně pro přenos signálu s vyššími kmitočky.

Další typ laserové diody, který byl použit, nese označení VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) vyzařující na vlnové délce 780 nm, což je na hranici viditelného spektra. Měření s touto diodou se však ukázalo jako zcela nevyhovující, s ještě horšími vlastnostmi a tudíž další práce s touto diodou by byla bezpředmětná.

4.2 Měření signálu pomocí LED diody

Další měření bylo realizováno pomocí LED diody nesoucí označení LED 740-01AU pracující na vlnové délce 740 nm. Její základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 7

POPIS	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA		
Provozní teplota	Top	-30 až +85	(°C)		
Skladovací teplota	Tstg	-30 až +100	(°C)		
vstupní proud	I _F	100	mA		
závěrné napětí	V _R	5	V		
POPIS	SYMBOL	MINIMUN	TYPECKÉ	MAXIMUM	TESTOVČÍ PODMÍNKA
vlnová délka (nm)	λ _p	735	740	745	I _F =50 mA
vstupní napětí (V)	V _F		1.85	2.00	I _F =50 mA
závěrný proud (uA)	I _R			10	V _R =5 V
doba náběhu	tr		80		I _F =50 mA
doba doběhu	tf		80		I _F =50 mA

Tabulka 7: Základní technická data LED diody 740-01AU

Stejnou metodu, kterou jsme již použili při měření laserové diody jsme aplikovali na měření LED diody. Nastavení vysílače a přijímače, jeho aretace bylo stejné jako v předcházejícím měření, které ilustruje obrázek 29. Při odečítání hodnot je patrné, že daný optický zdroj je mnohem efektivnější pro tento typ vysílače. Zatímco při užití laserové diody jsme se na frekvenci 1MHz pohybovali s velikostí amplitudy řádově v desítkách mili voltů, u LED diody jsme byli stále na hodnotě přes jeden volt. Velikosti amplitud signálů všech měřených frekvencí byly vždy detekovatelné na straně přijímače. Měření této diody proběhly opět v pěti cyklech a následně byl z těchto hodnot spočítán aritmetický průměr, který je znázorněn v pravém krajním sloupci níže zobrazené tabulky. Vzhledem k tomu, že tento typ

LED diody plně vyhovoval podmínkám přenosu signálu, bude LED dioda 740-01AU použita i pro závěrečné měření velikosti zpoždění. V tabulce 7 jsou hodnoty amplitud až do frekvence 10 MHz.

	1. měření		2. měření		3. měření		4. měření		5. měření	
f [MHz]	Pk-Pk [mV]	f [MHz]	Pk-Pk [mV]	f [MHz]	Pk-Pk [mV]	f [MHz]	Pk-Pk [mV]	f [MHz]	Pk-Pk [mV]	$\Sigma/5$ [mV]
0,05		0,05		0,05		0,05		0,05		
0,2	4280	0,2	3920	0,2	4280	0,2	3800	0,2	4040	4064
0,5	1960	0,5	1900	0,5	2060	0,5	2180	0,5	2180	2056
1	1100	1	1115	1	1116	1	1170	1	1110	1122,2
1,5	784	1,5	808	1,5	830	1,5	784	1,5	784	798
2	592	2	604	2	630	2	610	2	608	608,8
2,5	476	2,5	480	2,5	490	2,5	480	2,5	480	481,2
3	400	3	404	3	404	3	404	3	395	401,4
3,5	324	3,5	336	3,5	330	3,5	310	3,5	324	324,8
4	270	4	280	4	277	4	262	4	270	271,8
4,5	244	4,5	248	4,5	232	4,5	230	4,5	240	238,8
5	214	5	213	5	208	5	210	5	212	211,4
5,5	188	5,5	186	5,5	182	5,5	177	5,5	186	183,8
6	168	6	168	6	164	6	162	6	174	167,2
6,5	152	6,5	154	6,5	152	6,5	150	6,5	156	152,8
7	138	7	139	7	140	7	137	7	142	139,2
7,5	127	7,5	126	7,5	126	7,5	123	7,5	126	125,6
8	114	8	112	8	114	8	112	8	116	113,6
8,5	102	8,5	102	8,5	101	8,5	100	8,5	102	101,4
9	94	9	93	9	91	9	88	9	92	91,6
9,5	80	9,5	80,8	9,5	81	9,5	78	9,5	83	80,56
10	70	10	67	10	70	10	72	10	75	70,8

Tabulka 8: Hodnoty amplitud odpovídající LED 740-01AU

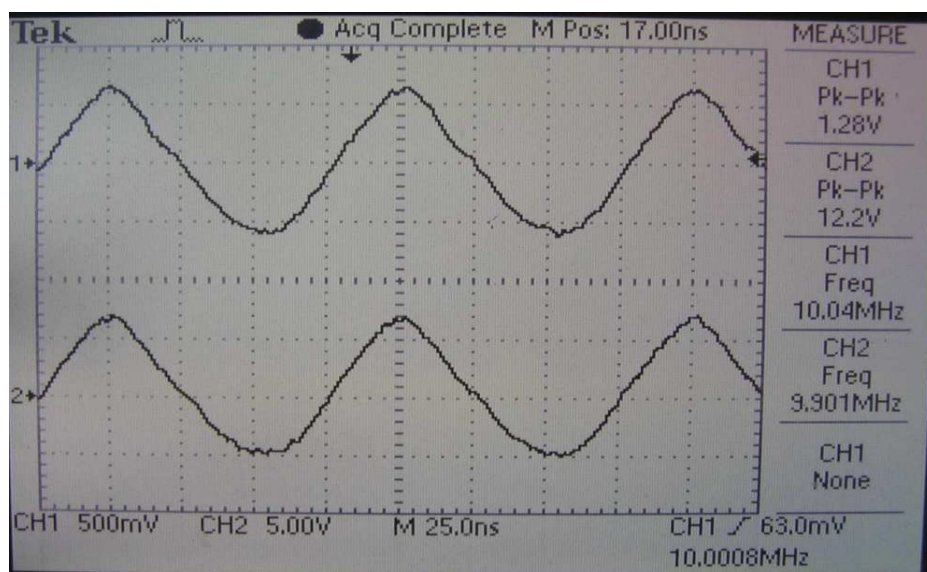
4.3 Měření zpoždění signálu

Dle požadavků diplomové práce, má být změřena velikost zpoždění dvoukanalového vysílače pomocí zpožďovače signálu od společnosti Thorlabs. Úplný název měřicího pracoviště je digitální zpožďovací generátor nesoucí označení DG100N. Jak už název napovídá, jedná se o generátor poskytující precísne kontrolovaný výstupní signál, až na šesti na sobě nezávislých kanálech [10]. Veškerá kanálová a systémová nastavení jsou ovládána přes počítač pomocí vlastního uživatelského softwaru DG100N nebo programovatelného terminálu, kde veškerá komunikace se samotným přístrojem je prostřednictvím rozhraní RS-232. Maximální frekvence signálu, se kterým může přístroj pracovat je 1 MHz. Výstupní pulsy jsou definovány dobou zpoždění a tzv. gate time. Doba zpoždění specifikuje čas mezi spouštěcím okamžikem definovaný jako t_0 a koncem pulsu, gate time určuje jeho šířku. Každý z těchto parametrů může být nastavován v krocích 25 ns.

Při prvotní práci s přístrojem, se však ukázalo, že systém není zcela vhodný pro navrhované měření. První z nedostatků byl ten, že přístroj nedokázal pracovat se signálem vyšším než je 1 MHz. Tento nedostatek by nebyl až natolik významný, jelikož zpoždění by se dalo měřit na nižších kmitočtech. Větší problém, který se zde vyskytoval, byla práce se samotným nastavením zpoždění signálu. Pro změření zpoždění jsme chtěli docílit toho, aby signál vyslaný do jednoho vysílače byl časově zpožděn o předem definovanou dobu, vůči signálu přivedeným do druhého vysílače. Takto definovaný způsob zpoždění však přístroj neumožňuje. Signál dokáže signál zpoždit ale pouze tak, že ho o předepsanou dobu zkrátí. K tomu, abychom mohli přistoupit k měření zpoždění, by byl tento přístroj nevhodný. Samotné uživatelské prostředí pro nastavení signálů je velmi nepřehledné a návod na obsluhu je velmi stručný. Vypracovat vhodnější uživatelské prostředí pro obsluhu přístroje a porozumět samotné práci s takovýmto přístrojem by bylo velmi zdlouhavé a spíše vhodné jako námět na jinou diplomovou práci.

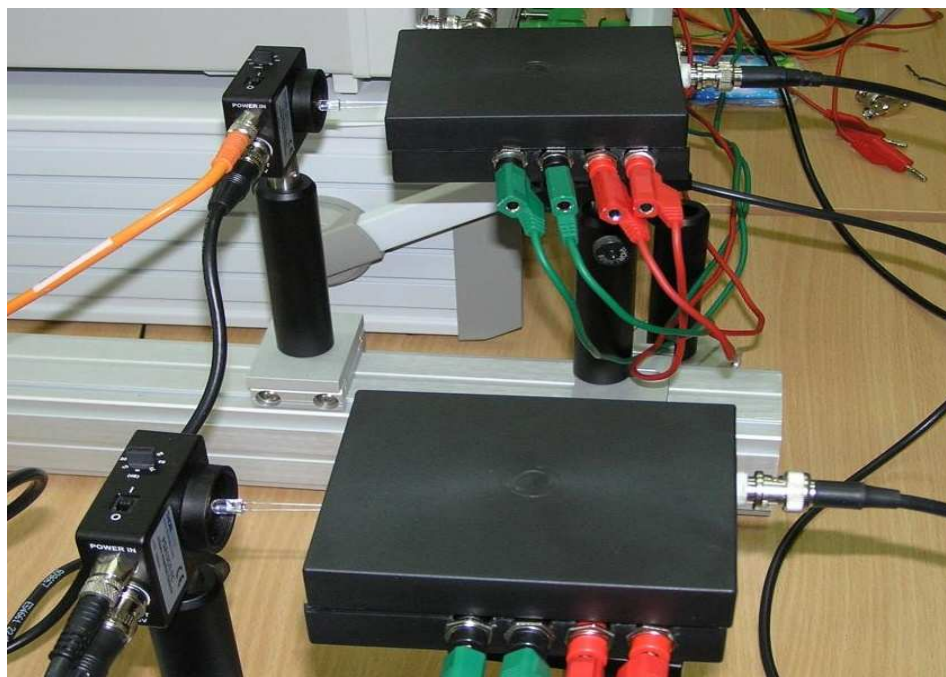
Jako alternativu pro změření velikosti zpoždění jsme tedy zvolili jiný postup. Jelikož se jedná o změření zpoždění dvoukanálového optického vysílače, tak je zřejmé, že budeme potřebovat dva vyrobené vysílače. S jedním z těchto prototypů již byla provedena prvotní měření na zjištění velikosti amplitud vybraných zdrojů optického záření. Na tyto vysílače byl přiveden obdélníkový signál z jednoho generátoru o velikosti asi jeden volt. Před vysílače byly postaveny optické přijímače PDA10CS-ec, se kterými již bylo měřeno. Výstupy těchto přijímačů byly přivedeny na osciloskop a z něj pak odečítány velikosti zpoždění těchto dvou signálů. Jelikož se jedná o dva stejně vyrobené vysílače, měly by být signály detekované na stranách přijímače stejné. Pravděpodobnost toho, že by byl některý ze signálů zpožděn nebo zrychlen vlivem přijímače se jevila jako minimální, vzhledem k jeho precizním parametrům.

První krok, který jsem podnikl, bylo ověření, zda signály přivedené na vstupy vysílačů jsou opravdu totožné a nejsou nijak znehodnocené. Pomocí BNC rozbočovacího konektoru a BNC kabelů jsem spojil výstup signálového generátoru s osciloskopem. Konektory vstupů vysílače, výstupu generátoru, vstupu osciloskopu a samotné kabely jsou všechny vhodně impedančně přizpůsobeny na hodnotu 50 Ω . Impedanční přizpůsobení nám zajišťuje, že by signál neměl být nijak tlumen či zkreslen. Výsledek na osciloskopu byly opravdu dva totožné signály bez ohledu velikosti jejich frekvencí. Na obrázku 30 jsou znázorněny signály vstupující do osciloskopu přímo z generátoru. Z obrázku je patrné, že k žádnému zpoždění zde nedochází a signály se dají považovat za totožné.



Obrázek 30: Signál z generátoru o kmitočtu 10 MHz.

Dle tohoto ověření se mohlo přistoupit k samotnému měření. Na obrázku 31 je znázorněno měřicí pracoviště. Signály vyslané z generátoru vstupují do optického vysílače, zde je signál vhodně upraven pomocí zesilovacích činitelů a vyslán přes LED diodu na optický přijímač. Ten signál detekuje a pomocí BNC kabelu jej přivede na osciloskop. Z osciloskopu odečteme signály a určíme jejich časový posuv co-by zpoždění.



Obrázek 31: Pracoviště pro měření zpoždění signálů

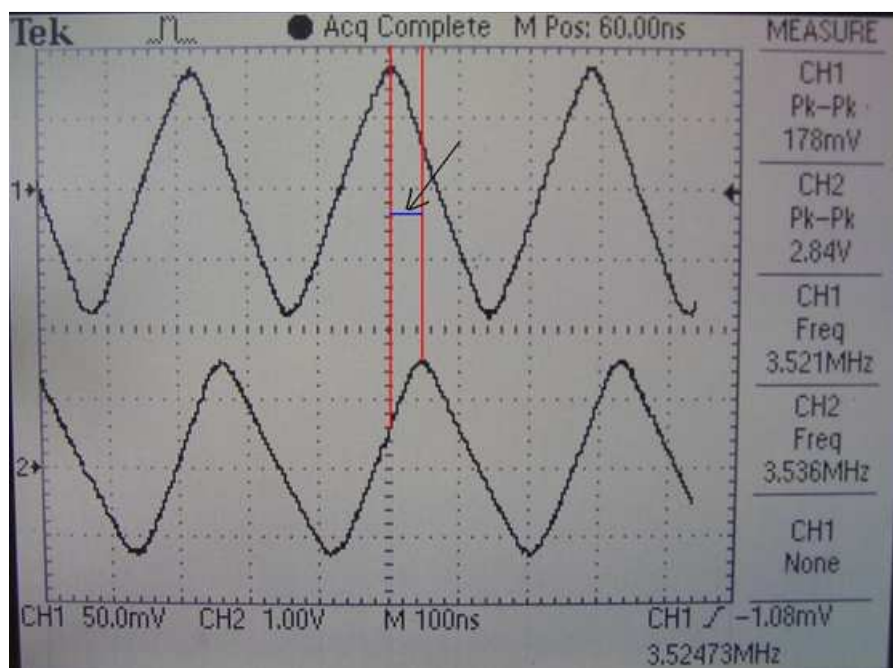
Určení zpoždění se provádělo jednoduchým způsobem a to tak, že se změřily časové posuvy vrcholů amplitud jednotlivých signálů. V tabulce 9 jsou určeny velikosti zpoždění signálů jednoho optického vysílače vůči druhému. Z výsledků v tabulce je patrné, že ačkoliv do vysílačů vstupuje naprosto totožný signál, na výstupu přijímače jsou tyto signály již časově posunuty. Při prvotních testování obou vysílačů jsem došel k závěru, že na jednom z vysílačů je signál na výstupu o něco slabší a hůře detekovatelný přijímačem. Signál zobrazený na osciloskopu z tohoto vysílače jevil jisté chvění, které se muselo doladit zvýšením amplitudy vstupního signálu na straně signálového generátoru. Jako příčinu tohoto nedostatku považuji chybu na plošném spoji. Jelikož se nejedná o profesionálně vyleptaný plošný spoj, ale pouze amatérsky vyrobený, odhaduji si říct, že se na plošném spoji může vyskytovat špatně vyleptaná cesta, popřípadě špatně napájený spoj. Tuto chybu jsem bohužel nedokázal detekovat a tudíž následně odstranit. Z výsledků je patrné, že optické vysílače mají téměř totožný signál při frekvenci 7,5 MHz, kde zpoždění signálu dosahuje 3 ns. Naopak nejvíce zpožděné signály se jeví při nižších kmitočtech od 1 do 3 MHz.

frekvence [MHz]	zpoždění [ns]
1	43
1,5	50
2	40
2,5	43
3	50
3,5	42
4	38
4,5	15
5	14
5,5	5
6	20
6,5	27
7	24
7,5	3
8	22
8,5	17
9	5
9,5	8
10	8

Tabulka 10: naměřené hodnoty zpoždění signálů

Měření zpoždění signálů byla opakována ve třech cyklech, ale výsledek byl vždy stejný a proto jsou v tabulce zapsány pouze hodnoty z jednoho měření. Jako příčinu časového zpoždění signálu, tedy považuji špatný spoj na plošném obvodu vzniklý v důsledku neprofesionální

výroby. Zda má optický přijímač vliv na časové zpoždění signálu bychom se přesvědčili pouze tak, že bychom na přijímač nechali dopadat světelné záření z některého precizně vyrobeného optického vysílače. Na Obrázku 32 je znázorněné zpoždění signálů při frekvenci 3,5 MHz, kde vyznačená šipka ukazuje časový posuv obou signálů.



Obrázek 32: Znázorněné zpoždění signálů z optických vysílačů.

5 Závěr

V této diplomové práci se podařilo vypracovat teoretický rozbor základní činnosti optických vysílačů. V druhé kapitole je ve stručnosti popsán základní princip a charakteristika optického komunikačního systému, jeho hlavní částí a funkce. Dílčí zaměření se pak specifikuje na oblast optického vysílače. Základní popis a princip činnosti tohoto zařízení je obsahem několika odstavců. Zaměření se zde klade především na jeho složení, požadavky a funkci jednotlivých bloků. Výrazná část druhé kapitoly je věnována popisu optických zdrojů. Těmi jsou v telekomunikační technice speciální LED diody nebo častěji používané laserové diody. Další částí této kapitoly jsou základní principy LED diody. Zde jsou zmíněny hlavní výhody a nevýhody použití tohoto světelného zdroje. Na obrázcích jsou znázorněny pro lepší pochopení dva základní principy pro polovodičové zdroje a to absorpce a emise fotonu. Obě dvě podstaty jsou zároveň vysvětleny pro bližší pochopení v textové podobě. Součástí tohoto oddílu jsou i obrázky, které ilustrují závislosti těchto polovodičových součástek na různých veličinách.

Návazně na principy LED diody přechází druhá kapitola k pojednání o laserových diodách. Struktura popisu je velice podobná. V první řadě je opět popsán jejich základní princip, využití spontánní a stimulované emise, které jsou graficky znázorněny pro lepší pochopení. Předposlední část druhé kapitoly tvoří pojednání o použitých modulacích v optických přenosových systémech. Jednoduchý princip nejčastěji používané modulace tzv. ON-OFF KLÍČOVÁNÍ je kromě textového popisu i ilustrován. Závěrečná část kapitoly je zaměřena na jednoduchý popis a ilustraci optického vysílače s užitím LED a laserové diody.

Třetí kapitola nese název návrh a realizace optického vysílače. První část se zabývá návrhem prototypu. Ve stručnosti je zde pojednáno o vstupním signálu a jeho vlastnostech. Následuje popis a volba operačního zesilovače, který tvořil první část optického vysílače. V této části se hovoří o tom, proč byla volba zesilovače právě taková a o jeho výhodných vlastnostech. Základní schéma zapojení operačního zesilovače je rovněž ilustrováno pro lepší orientaci čtenáře. Návrh výkonového zesilovače navazuje na předchozí část. Podrobně je zde popsána nejdůležitější část návrhu, kterou tvořila volba pracovního bodu tranzistoru. Tato část popisuje vhodný výběr tranzistoru a využití tzv. Darlingtonova zapojení. Metoda tohoto zapojení jeho hlavní výhody a ilustrace je opět zmíněna na pochopitelné úrovni. Další část třetí kapitoly pojednává o provedení simulace celého schématu. Okrajově je zde zmíněn popis využitého softwaru a práce s ním.

Realizace optického vysílače je popsána v několika odstavcích. První provedení proběhlo na kontaktním poli, na kterém bylo aplikováno prvotní měření. Získané hodnoty tohoto měření jsou obsahem tabulky této diplomové práce. Po prvotních měřeních následovala realizace optického vysílače na plošný spoj. Jedná se o amatérský výrobek usazený do plastové krabičky. Postup při výrobě je stručně popsán a finální výrobek je vyobrazen ve dvou fotografiích.

Poslední část diplomové práce tvořila měření. Úvodní měření probíhala pomocí dvou optických zdrojů záření, jejich přesné označení najdeme ve čtvrté kapitole. Účelem těchto měření bylo zjistit velikosti amplitud detekované na straně přijímače. Základní parametry použitého přijímače a jeho fotografie je opět součástí diplomové práce. Hodnoty v podání velikosti amplitud jsou znázorněny v tabulkách. Veškerá měření byla opakována v pěti cyklech pro věrohodnější výsledky. Z těchto výsledků pak byly vypracovány aritmetické průměry. Výsledná měření nám poskytla odpověď na to, který z optických zdrojů bude použitý pro závěrečné měření.

Finální měření měla být zjištěna velikost zpoždění signálu pomocí digitálního zpožďovacího generátoru. Základní charakteristika a technická data jsou popsány na závěrečných stranách práce. Během měření bylo zjištěno, že konkrétní přístroj nebyl vhodný pro stanovená měření. Jeho pracovní prostředí a nastavení nevyhovovalo potřebám pro realizaci našeho úkolu. Největší problém byl v nastavení zpoždění signálu. Bližší nedostatky pro provedení měření jsou opět obsahem posledních stran. K tomu, aby byla splněna poslední část diplomové práce, byla zvolena alternativa v podání změřením zpoždění signálu bez užití zpožďovacího generátoru. V případě, že by se jednalo o dva precizně vyrobené vysílače, měly by být signály detekované na stranách přijímačů totožné. Z naměřených a následně odečtených hodnot jsme zjistili, že zde dochází k časovému posuvu signálů. Velikosti posuvu jsou obsaženy v poslední tabulce diplomové práce. Jako důvod zpoždění signálu považuji nedostatky vzniklé na plošném spoji při jeho výrobě. S ohledem na naměřené výsledky si však odhaduji říct, že veškerá měření proběhla v souladu s pokyny diplomové práce a dílčí úkoly se dají považovat za splněné. Pro další pokračování této práce bych se zaměřil na samotný návrh optického vysílače a výkonový obvod bych zkusil přizpůsobit pro konkrétní typ laserové diody, které jsou v dnešních telekomunikacích častěji používané. S takto navrženým vysílačem s konkrétním zdrojem záření by se dala realizovat různá měření.

6 Literatura

- [1] Maschke J. Optoelektronika, FVT UO, Brno 2001
- [2] Wilfert O. Optoelektronika, FEI VUT, Brno 2002
- [3] Horgošová K. Diplomová práce, Ostrava 2009
- [4] Doleček J. Optoelektronika a optoelektronické prvky, BEN technická literatura, Praha 2005
- [5] Univerzální optický vysílač
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05006/index.html>
- [6] A high dI/dt CMOS differential optical transmitter for a laser diode
<http://people.ee.duke.edu/mbrooke/Thesis/sungyoung.pdf>
- [7] Punčochář J. Operační zesilovače v elektrotechnice, BEN technická literatura Praha 1996
- [8] Wikipedie – *Wikipedie, otevřená encyklopedie*
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tranzistor>
- [9] Burian M. Semestrální práce z fyziky, Liberec 2006
- [10] DG 100N Digital delay generator. Thorlabs®. Datasheet.
<http://www.thorlabs.com/Thorcat/6400/6473-D05.pdfv>
- [11] InGaAs Amplified Detector. Thorlabs®. Datasheet.
<http://www.thorlabs.com/catalogPages/934.pdf>